



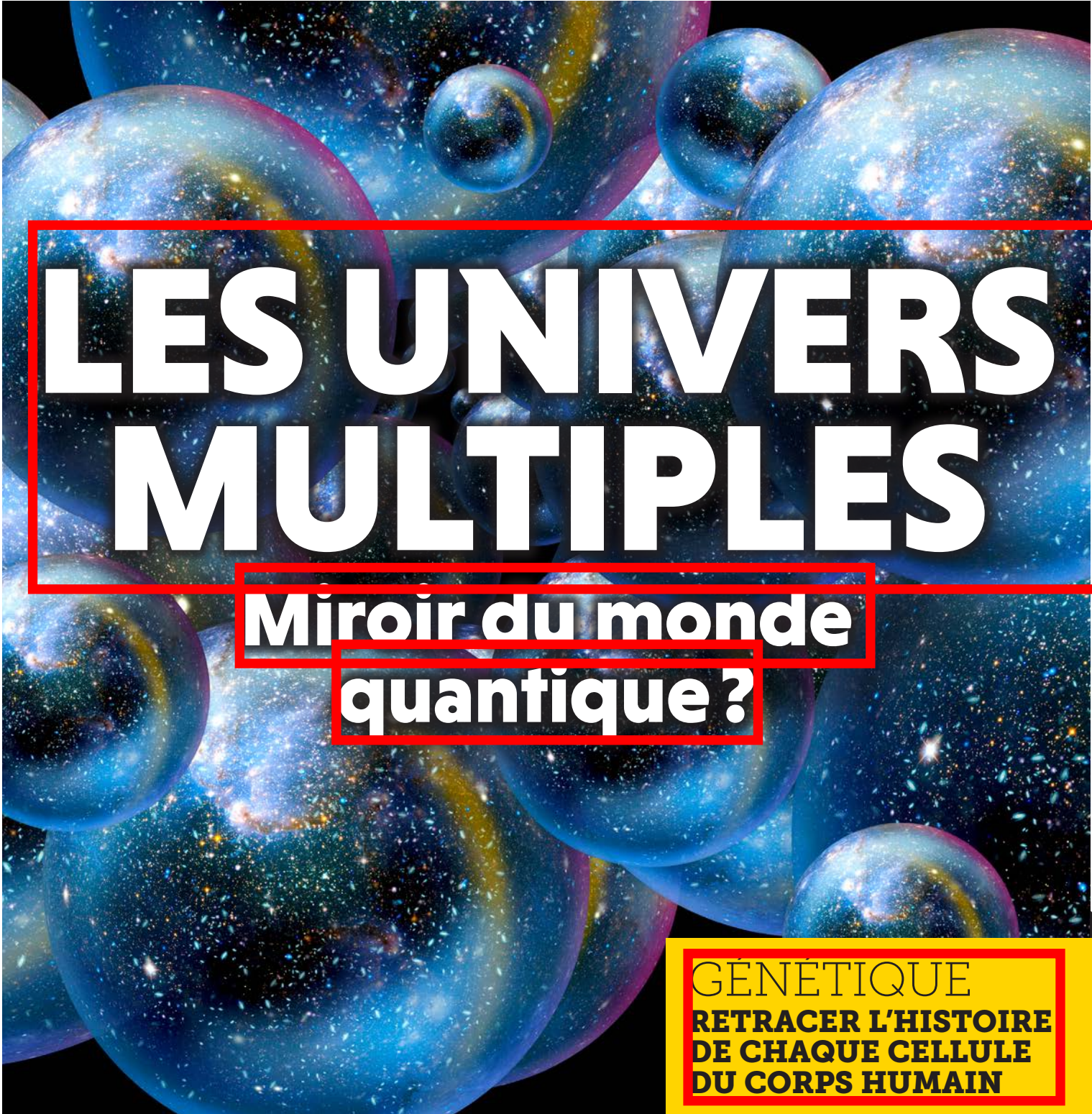
SCIENCE

MATHÉMATIQUES
**CINQ ÉNIGMES
POUR LA
RENTRÉE**

GÉOSCIENCES
**UN VOLCAN
AUX PORTES
DE ROME**

ZOOLOGIE
**COMMENT
TRANSFORMER UN
RENARD EN CHIEN**

SEPTEMBRE 2017
N° 479

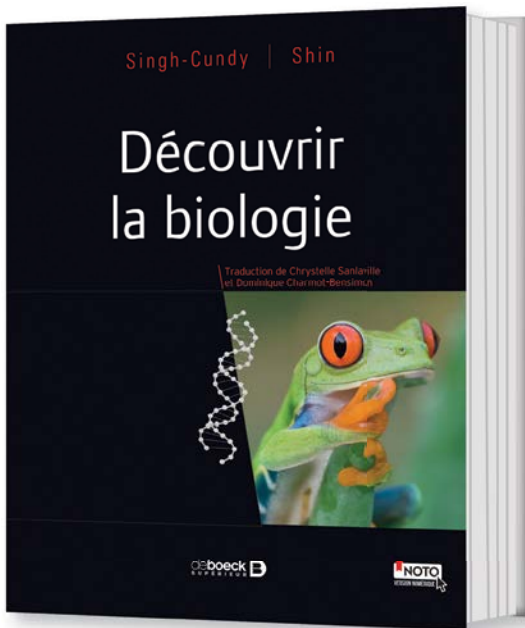


LES UNIVERS MULTIPLES

**Miroir du monde
quantique ?**

GÉNÉTIQUE
**RETRACER L'HISTOIRE
DE CHAQUE CELLULE
DU CORPS HUMAIN**

Ce sont nos lecteurs qui en parlent le mieux !



Excellent livre !

L'intérêt de ce livre réside dans la mise en relation des connaissances avec les questions d'éthique sociétale actuelles. (...) L'ensemble est agréable à lire. toujours intéressant.

J'aime ce livre car il est interactif, il met la théorie en pratique à travers des exemples concrets de la vie de tous les jours, cela à chaque chapitres du livre. (...) Je le recommande vivement !

source : Amazon

Une excellente introduction à la biologie pour les étudiants de L1-L2 et tous les passionnés !

Très didactique avec de nombreux encadrés et exemples. Répond aux préoccupations actuelles posées par la biologie dans son environnement. + de 2500 illustrations de qualité.

978-2-8073-0287-7 - Edition 2017 - 864 p. - 62 €

Ce livre est une merveille. Les illustrations sont très abondantes et très claires.(...)

Je n'ai qu'un regret, c'est de ne pas l'avoir acheté plus tôt car il m'aurait bien aidé pour ma première année !

Vraiment c'est un livre à avoir dans sa bibliothèque si, comme moi, vos cours et livres de bio ont 20 ans. Jetez les et achetez ce livre.

source : Amazon

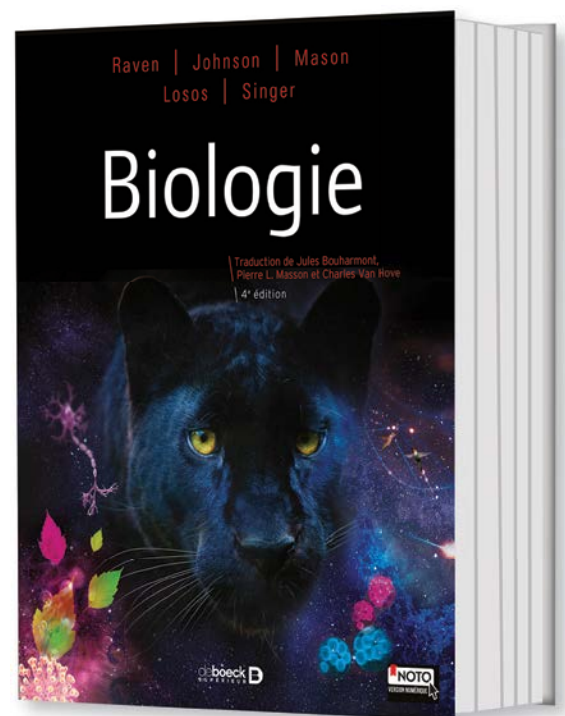
L'ouvrage indispensable en biologie

Une référence internationale !

Relue et adaptée par des équipes universitaires françaises et belges, elle propose une approche progressive et complète.

500 exercices avec corrigés (QCM)

+ de 2000 photos et illustrations en couleurs



978-2-8073-0615-8 - Edition 2017 - 1480 p. - 75 €
Existe en version cartonnée

En librairie et sur
www.deboecksuperieur.com

deboeck
SUPÉRIEUR **B**

www.pourlascience.fr

70 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
assisté de Clément Dufrenne, Donovan Thiebaud
et Émile Heynemann

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Laurence Hay et Arthur Peys,
assistés de William Armand

Direction financière et direction du personnel:
Marc Laumet

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directrice de la publication et gérante: Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry
et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Antoine Berut, Neïla Bhouri, Maud Bruguière, Silvana
Condemi, Philippe Grandcolas, Agatha Liévin-Bazin, Anne
Masè, Christophe Pichon, Daniel Tacquenier, Boris Thibert

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

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

PUBLICITÉ France

Directeur de la publicité: Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience.fr

Tél. 01 55 42 84 28

ABONNEMENTS

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

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

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

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Benjamin Boutonne

Tél. 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de 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
Papiers à fibres recyclés: 30 %
Eutrophisation ou « Impact sur l'eau »: P. 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LA PLURALITÉ QUANTIQUE DES MONDES

Le 17 février 1600, sur la place Campo de' Fiori à Rome, le philosophe et ancien frère dominicain Giordano Bruno mourait sur le bûcher. Son crime? Avoir tenu des positions insupportables pour l'Église et ses dogmes. Il s'agissait surtout d'idées touchant à la religion, mais pas seulement. Bien que les ressorts de sa pensée fussent plus théologiques et philosophiques que scientifiques, Bruno a notamment été l'un des pre-

miers à proposer l'existence d'un nombre infini de mondes, de « innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils », écrivait-il ainsi en 1584 dans *L'Infini. L'univers et les mondes*.

Les mondes multiples pressentis par Bruno sont depuis quelques années, avec la découverte de milliers d'exoplanètes, un fait solidement établi. Mais la science va encore plus loin. L'existence d'un grand nombre, voire d'une infinité, d'univers disjoints est une idée qui gagne en popularité parmi les spécialistes du cosmos. Elle émerge naturellement des théories de l'« inflation cosmique » échafaudées pour résoudre les difficultés de la théorie classique du Big Bang.

Une autre pluralité de mondes provient de la physique quantique, théorie née au début du xx^e siècle et que rien ne démentit, mais dont les lois étranges se prêtent à diverses interprétations. Or l'une des interprétations possibles de la théorie quantique, celle de Hugh Everett, proposée en 1957, est que, à chaque fois qu'une mesure est effectuée, le monde se dédouble en autant d'exemplaires qu'il y a de résultats possibles.

Les univers multiples de la cosmologie et les mondes multiples d'Everett ont-ils un rapport? C'est la thèse audacieuse du physicien Yasunori Nomura, pour qui les deux concepts sont équivalents (voir pages 25 à 39). Une thèse qui ne vaudra pas à son auteur le bûcher: tout au plus cette théorie sera-t-elle sacrifiée sur l'autel de la réfutabilité, ou guillotinée par le rasoir d'Occam!

S

SOMMAIRE

N° 479 /
Septembre 2017

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

Le fémur néandertalien
et l'histoire des humains

Du carburant à partir
de lumière et de CO₂
Une tour de fourmis
Goutte saturnienne
Une autre menace

sur la couche d'ozone

Sphère réduite, mais
distances inchangées

Anticiper une éruption

Le cycle du Soleil

enfin compris

Phagothérapie: le rôle
du système immunitaire

P. 18

FESTIVITÉ DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS

INFORMATICUS

Écrans... de fumée

Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS

SOCIOLOGIQUES

Astrologie

autoréalisatrice

Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 40

SCÉNARIOS DE LA TERRE

LE VOLCAN AUX PORTES DE ROME

Fabrizio Marra

À 20 kilomètres
de la «ville éternelle»,
une zone volcanique est
au repos depuis 36 000 ans.
Mais son histoire éruptive
et son soulèvement
actuel, d'environ deux
millimètres par an, suggèrent
qu'elle redevient active.



P. 56

GÉNÉTIQUE

SUIVRE LE DEVENIR DE CHAQUE CELLULE DU CORPS

Ewen Callaway

Les biologistes s'attaquent
aujourd'hui à un défi
 titanique: retracer
la filiation de chaque cellule
 lors du développement
 d'un individu, de l'embryon
 à l'adulte.



P. 48

TECHNOLOGIE

VERS LA FIN DES PARKINGS

Carlo Ratti et Assaf Biderman

L'utilisation de réseaux
de véhicules autonomes
et de carrefours intelligents
transformera en profondeur
les transports et paysages
urbains. Pour une meilleure
qualité de vie dans les villes?
Oui, mais à condition
d'éviter les pièges qui
menacent.



P. 64

ZOOLOGIE

COMMENT TRANSFORMER UN RENARD EN CHIEN

Olyudmila Trut

et Lee Alan Dugatkin

Des renards au museau
arrondi, dotés d'une queue
bouffue qu'ils remuent de
plaisir à la vue des humains...
Ces drôles de canidés
affectueux sont le fruit
d'une expérience originale
menée depuis près
de 60 ans en Sibérie
pour mieux comprendre
la domestication.



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 :

© Getty Images/Science Photo Library

Les portraits des contributeurs
ont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
l'abonnement *Pour la Science* broché
sur une partie du tirage.

Ce numéro comporte également
un encart *Rue des Etudiants*
sur une sélection d'abonnés France
Métropolitaine.



P.72

HISTOIRE DES SCIENCES

LES MALHEURS DE L'HERBIER LABILLARDIÈRE

Bertrand Daugeron

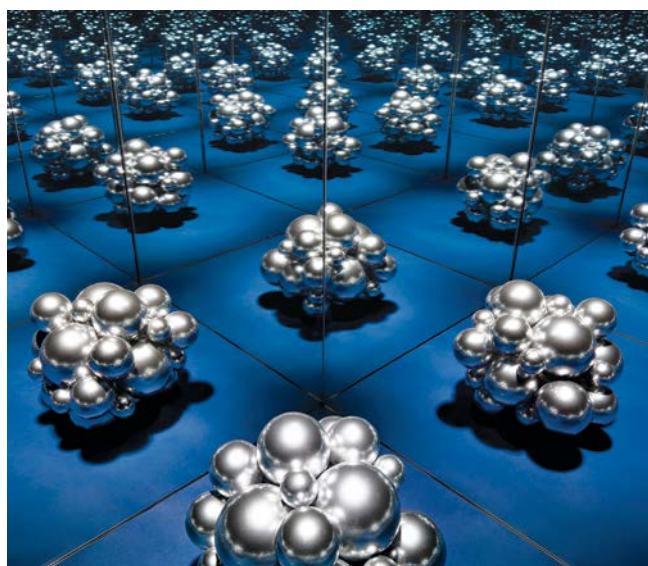
Qui aurait imaginé que la chute de Louis XVI bouleverserait aussi le destin des planches d'un herbier à l'autre bout du monde? C'est pourtant le constat que fit le botaniste Jacques Labillardière à ses dépens, lors d'une escale à Java en octobre 1793...

À LA UNE

P.25

ASTRONOMIE / COSMOLOGIE

LES UNIVERS MULTIPLES MIROIR DU MONDE QUANTIQUE?



P.26

LE MULTIVERS QUANTIQUE

Yasunori Nomura

La cosmologie laisse penser que notre univers n'en serait qu'un parmi d'innombrables autres. Et si cette multiplicité d'univers coïncidait avec l'idée des mondes multiples avancée il y a 60 ans pour comprendre la physique quantique?

P.36

« L'INFLATION COSMOLOGIQUE RESTE LE SCÉNARIO LE PLUS SATISFAISANT »

Entretien avec Sébastien Renaux-Petel

Ingénieur essentiel de la théorie moderne du Big Bang et des spéculations sur les univers multiples, l'inflation cosmique est une idée qui agite encore beaucoup les théoriciens. Pourquoi?

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

CINQ ENIGMES POUR LA RENTRÉE

Jean-Paul Delahave

Un bon problème mathématique doit avoir une solution qui ne vient pas toute seule. En voici cinq exemples...

P.86

ART & SCIENCE

Le bug des cygnes
Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Les tubes hurleurs
Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

La frontière invisible
de l'archipel malais
Hervé le Guvader



P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Spaghettis de protéines
Hervé This

P.98

ÉPILOGUE

A

CTUALITÉS

- 2.6 Echos des labos
- 2.18 Livres du mois
- 2.20 Agenda
- 2.22 Homo sapiens informaticus
- 2.24 Cabinet de curiosités
- 2.26 Sociologie

PALEOANTHROPOLOGIE

LE FÉMUR QUI PRÉCISE L'ÉVOLUTION DES NÉANDERTALIENS



Le fossile HST est une diaphyse de fémur découverte en 1937, qui contenait encore de l'ADN néandertalien.

L'ADN mitochondrial contenu dans un fémur néandertalien invite à réécrire l'histoire de la colonisation de l'Eurasie et du métissage entre Néandertaliens et hommes modernes.

L'équipe de Cosimo Posth, de l'institut Max-Planck pour l'histoire humaine de Tübingen, a séquencé le génome mitochondrial d'un fémur néandertalien nommé HST parce qu'il a été découvert en 1937 dans la grotte de Hahnenklee, en Allemagne.

Le résultat l'amène à proposer un cadre chronologique au scénario de la constitution de la population néandertalienne et de son métissage avec *Homo sapiens*.

Les mitochondries sont les organites produisant l'énergie de nos cellules. Elles ont un génome transmis uniquement par

la mère, de sorte qu'elles servent à retracer les lignées féminines et à dater leurs divergences. Les mutations s'accumulent en effet dans l'ADNmt (l'ADN mitochondrial) avec un taux prévisible, ce qui permet d'estimer la durée écoulée depuis l'ancêtre commun de deux individus.

C'est en appliquant une méthode comparable que les auteurs de précédentes recherches ont établi à partir des mutations accumulées dans le chromosome Y (le chromosome sexuel masculin) et d'autres parties du génome nucléaire (le génome contenu dans le noyau cellulaire) que la divergence

neanderthalensis-sapiens s'est produite il y a entre 765 000 et 550 000 ans.

Toutefois, lorsqu'on fait le même exercice à partir de l'ADNmt, on aboutit à une divergence *neanderthalensis-sapiens* il y a 400 000 ans environ (au plus 470 000 ans). On constate en outre que l'ADNmt des Néandertaliens est plus proche de celui des hommes modernes qu'il ne l'est de celui d'un membre de leur population ancestrale. Sorte de miracle scientifique, en 2013, le génome mitochondrial de cet individu découvert dans une grotte en Espagne et mort il y a 450 000 ans avait pu être séquencé. Après beaucoup de débats, des paléogénéticiens ont proposé, pour expliquer cette incohérence, qu'un groupe humain plus proche génétiquement des *Homo sapiens* que des Néandertaliens a introduit son ADNmt en Europe.

Vers une production de carburant solaire carboné

En cette période de réflexions sur la transition énergétique, l'équipe de Marc Robert et Julien Bonin, de l'université Paris-Diderot et du CNRS, a développé un nouveau procédé qui transforme le dioxyde de carbone (CO_2) en méthane (CH_4), sous l'action de la lumière solaire et d'un catalyseur à base de fer. Marc Robert nous détaille le fonctionnement de cette photosynthèse artificielle.



Propos recueillis par CLEMENT DUFRENNI

MARC ROBERT
Professeur à l'université Paris-Diderot

Quel est le principe de votre procédé ?

Marc Robert : Notre procédé consiste à remplacer les atomes d'oxygène du dioxyde de carbone par des atomes d'hydrogène. Pour réaliser cette hydrogénation complète du dioxyde de carbone, nous ajoutons de petites quantités d'alcool ou d'eau afin d'apporter les protons (H^+) nécessaires. Cette source de protons aide les atomes d'oxygène à quitter la molécule de dioxyde de carbone, et permet aussi de « protoner » le carbone pour aboutir au méthane. Afin de déclencher la réaction, il est essentiel d'avoir une source d'énergie. Dans notre cas, nous utilisons le rayonnement solaire, et plus précisément le domaine visible du spectre, produit en laboratoire grâce à un simulateur solaire et un filtre qui sélectionne des longueurs d'onde supérieures à 400 nanomètres. Pour rendre la réaction possible, il faut enfin un catalyseur qui accélère les étapes du processus. Le nôtre est à base de fer.

Quelle est l'originalité de votre procédé par rapport aux recherches précédentes ?

M. R. : D'une part, nous proposons ici une piste pour fabriquer un carburant solaire à partir d'une source de carbone habituellement considérée comme un déchet, le CO_2 . D'autre part, notre procédé fonctionne dans des conditions très douces, à température et pression ambiantes. Le produit obtenu, le méthane, est directement utilisable dans des applications de transport ou de chauffage (il constitue par exemple 75 % du gaz de ville). Le CO_2 peut ainsi rentrer dans un cycle vertueux, une économie circulaire : il est transformé en carburant, puis, au cours de la combustion, celui-ci libère du CO_2 qui peut-être à nouveau transformé

en méthane, etc. Par ailleurs, nous utilisons un catalyseur à base de fer qui est de loin le métal le plus abondant, et donc le moins cher. Habituellement, en catalyse, ce sont des métaux rares, et donc chers, qui sont employés. De plus, la synthèse du catalyseur est bien maîtrisée et simple, ce qui fait que son coût reste modeste à l'échelle globale du système. Enfin, le fer n'est pas toxique et est biocompatible. Avec ce catalyseur, nous avons prouvé qu'il est possible de créer un carburant solaire dans des conditions simples.

Est-ce la première fois que l'on utilise un catalyseur à base de fer ?

M. R. : Non, mais jusqu'à présent, les catalyseurs testés n'avaient pas permis d'aller au-delà du monoxyde de carbone, un intermédiaire de la réaction, et d'obtenir du méthane. Dans ce nouveau procédé, le catalyseur de fer synthétisé a une structure et des propriétés chimiques inspirées de la famille des porphyrines, des molécules qui transportent le dioxygène dans le sang. C'est cette structure moléculaire qui a fait la différence.

Actuellement, le rendement est de 0,18 %. Comment envisagez-vous de l'améliorer ?

M. R. : Ce chiffre est le rendement total, obtenu en rapportant la quantité finale de produits, le méthane, à la quantité initiale de photons de lumière absorbés par le système. Certes, il est faible, mais le système présente déjà beaucoup d'avantages : la lumière est gratuite, disponible partout, inépuisable... Pour aller vers des applications concrètes, nous devons avant toute chose mieux comprendre l'ensemble du processus catalytique et des différentes étapes mises en jeu, ce qui nous donnera les outils pour améliorer le rendement et passer à une échelle supérieure. ■

■ Bao et al. *Nature*, en ligne 17 juillet 2011

Le fossile HST aide-t-il à préciser ce scénario considéré comme le plus économique ? L'équipe de Cosimo Posth s'est mise à le penser lorsqu'elle a découvert que son ADNmt est très différent de celui des autres Néandertaliens. Mais pour interpréter cette information, il fallait connaître son âge. Comme les méthodes physiques de datation sont inapplicables dans le cas de HST, l'équipe de Cosimo Posth a compté les mutations accumulées dans son ADNmt et dans celui d'une dizaine de Néandertaliens d'origines différentes. Résultat : l'ADNmt de HST aurait 24 000 ans, soit à peine moins que le plus ancien des génomes mitochondriaux de l'échantillon analysés, celui d'un Néandertalien de l'Altai en Sibérie, vieux de 130 000 ans. Ainsi, il y a plus de 100 000 ans, au moins deux lignées mitochondriales néandertaliennes différentes coexistaient en Eurasie ; cela suggère que la diversité et donc la taille de la population néandertalienne étaient alors plus grandes, et qu'elles se sont réduites ensuite.

Par ailleurs, les calculs génétiques des chercheurs ont montré que la divergence entre les ADNmt de HST et de tous les autres Néandertaliens doit être antérieure à 220 000 ans. Ainsi, l'ADNmt de HST invalide le scénario de l'introduction, dans la population néandertalienne, d'ADNmt différent de celui d'origine et proche de celui d'*H. sapiens* dans un cadre chronologique. Dans l'esprit des chercheurs, après la divergence mitochondriale *neanderthalensis-sapiens* (datée à un maximum de 170 000 ans), mais avant la séparation entre les génomes mitochondriaux de HST et des autres Néandertaliens, un groupe humain est passé d'Afrique en Europe, où son ADNmt s'est imposé dans la population néandertalienne. Passée inaperçue jusque-là, cette migration a dû donc se produire entre 470 000 et 220 000 ans. Le flux génique correspondant aurait été assez faible pour peu influencer l'ADN nucléaire des Néandertaliens, mais assez important pour provoquer le remplacement complet de leurs lignées mitochondriales, notamment celle de HST.

L'extraction d'ADN nucléaire de HST nous en apprendrait plus. Étant donné son âge et sa probable contamination par tous ceux qui ont manipulé le fossile depuis 80 ans, cela promet d'être difficile... ■

FRANÇOIS SAVATIER

■ Posth et al. *Nature*, en ligne le 4 juillet 2011

ETHOLOGIE

UNE TOUR DE FOURMIS

Pour ne pas écraser leurs congénères, les fourmis qui se lient les unes aux autres se comportent comme un fluide. Une découverte qui pourrait inspirer les essaims de robots

Pour traverser une rivière ou se protéger d'une inondation, les fourmis de feu (*Solenopsis invicta*) unissent leurs forces en formant des radeaux ou en construisant des tours. Mais, dans ce dernier cas, comment maintiennent-elles la

rouvent à la base de l'édifice? Réponse: les fourmis sont continuellement en mouvement dans la tour qu'elles forment, et se comportent alors comme un fluide.

Les chercheurs avaient déjà compris comment les fourmis de feu construisent des radeaux. Elles s'accrochent les unes aux autres par les pattes et s'orientent de façon à créer des cavités d'air. Elles répartissent leur poids pour former une structure flottante. L'équipe menée par Craig Tovey, de l'Institut de technologie de Géorgie, à Atlanta, a cherché à comprendre comment les insectes réussissent à former une tour.

En laboratoire, l'équipe a filmé à l'aide de caméras ultrarapides la façon dont les fourmis s'assemblent autour d'une barre glissante en téflon. Elle a aussi marqué la moitié de la colonie avec un traceur radioactif afin de suivre les insectes dans la tour ainsi formée.

Les fourmis procèdent par tâtonnement. Elles consolident en permanence les parties les plus fragiles jusqu'à ce que la structure soit solide. Les chercheurs ont montré que chaque insecte peut supporter jusqu'à trois congénères. Et lorsqu'une fourmi est surchargée, elle lâche ses voisines et redescend en bas de la colonne. Là, elle refait surface à la base de la tour.

La structure en forme de cloche ressemble à un fluide, et chaque fourmi y supporte le même poids. «Les fourmis se comportent comme une fontaine d'eau, mais à l'envers», explique Craig Tovey.

D'après Guy Theraulaz, du Centre de recherche sur la cognition animale de Toulouse, les spécialistes savaient que la structure de la tour serait dynamique, mais les vidéos sont le premier enregistrement de ce phénomène.



La structure obtenue par les fourmis n'est pas sans rappeler la tour Eiffel, un autre édifice aux propriétés mécaniques spectaculaires.

8 cm

C'EST LA HAUTEUR QUE PEUVENT ATTEINDRE LES TOURS FORMÉES PAR LES FOURMIS DE FEU, CE QUI CORRESPOND À 20 FOIS LEUR TAILLE.

En utilisant des modèles mathématiques, l'équipe a en outre réussi à prédire la forme et le taux de croissance des tours. Les chercheurs savaient déjà que lors de la construction d'un radeau, les fourmis de feu n'obéissent pas à un commandement centralisé, mais agissent individuellement. Ce comportement peut être modélisé avec trois règles simples qui sont ensuite intégrées dans un modèle mathématique de la structure.

Les chercheurs ont été surpris de constater que lorsque les fourmis construisent des tours, elles «obéissent aux mêmes règles individuelles et décentralisées», note Craig Tovey. Les deux structures sont pourtant différentes: le radeau est statique tandis que la tour est dynamique.

Ces découvertes pourraient inspirer les chercheurs qui travaillent sur la programmation d'essaims de petits robots pour accomplir une tâche. «Comprendre comment les fourmis peuvent bâtir ce genre de structures 3D solides en ne suivant que quelques règles très simples peut nous aider à maîtriser la programmation de ces minuscules robots polyvalents. La prochaine étape est de comprendre comment les fourmis construisent des ponts», conclut Craig Tovey. ■

AURA CASTELLER

Phonekeo et al., Royal Society Open Science, en ligne, 12 juillet 2017

Article publié initialement par Nature le 12 juillet 2017 sous le titre « Ant colonies flow like fluid to build tall towers » www.nature.com/news/ant-colonies-flow-like-fluid-to-build-tall-towers-1.22290. Traduction et édition réalisées par Pour la Science.

POMPEI : LA TOMBE
DE « PRINCEPS »

La tombe d'un célèbre entrepreneur en spectacles de gladiateurs de Pompéi, mort une année avant l'éruption, vient d'être retrouvée. Il était manifestement assez notable pour avoir laissé dans les textes son nom, Gneo Alleo Nigidio Maio, et son surnom – *princeps*, c'est-à-dire « celui qui occupe le premier rang ». Sa richesse et sa réputation sont d'ailleurs célébrées dans une longue épithaphe gravée sur l'un des côtés du sarcophage de marbre où il repose.

LES TARDIGRADES,
PROCHES
DES NÉMATODES

Les étranges animaux sont célèbres pour leur grande résistance à des conditions de froid extrême, d'absence d'eau, de rayonnement intense... Une question en suspens était leur place dans le règne du vivant : sont-ils plus proches des arthropodes ou des vers nématodes ? Yuki Yoshida, de l'université Keio, au Japon, et ses collègues ont montré, grâce à une analyse génétique, que les tardigrades avaient cinq gènes *HOX* (impliqués dans la structuration de l'embryon) comme les nématodes, et beaucoup moins que chez les arthropodes.

LUMIÈRE NOCTURNE
ET POLLINISATION

La lumière artificielle nocturne, ou pollution lumineuse, a de importantes conséquences sur la pollinisation des fleurs, ont montré Colin Fontaine, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris, et ses collègues. Ces chercheurs ont étudié les fleurs de prairies éclairées artificiellement en permanence. Résultat : les visites de pollinisateurs nocturnes ont diminué de 62 %. Plus inquiétant encore, certaines plantes voient leur production de fruits baisser, ce qui réduit, à terme, les ressources alimentaires des pollinisateurs diurnes.

DEUX EAUX
LIQUIDES

D'une façon étonnante, les propriétés physiques et chimiques de l'eau sont encore relativement mal connues.

Fivos Perakis, de l'université de Stockholm, a mis en évidence l'existence de deux états différents de l'eau liquide. En phase liquide, l'eau fluctue localement entre ces deux états.

« On sait que la glace d'eau peut adopter plusieurs états solides cristallins, ordonnés, mais qu'elle existe aussi dans un état amorphe, désordonné, un peu comme un liquide. Cet état amorphe possède en fait deux formes, l'une de faible densité et l'autre de forte densité », explique Eric Ferrage, de l'institut IC2MP, du CNRS et de l'université de Poitiers. Les chercheurs soupçonnaient que ces deux formes solides amorphes avaient leurs équivalents en phase liquide, mais ceux-ci n'avaient pas été observés. Fivos Perakis et ses collègues ont donc étudié la transition entre les deux phases solides amorphes qui s'effectue entre 110 et 130 kelvins, à la pression atmosphérique. L'enjeu est de voir comment la phase amorphe de haute densité passe à l'état de basse densité : la transition se fait-elle directement ou passe-t-elle par des phases liquides intermédiaires, métastables et en surfusion ?



ILLUSTRATION : J. PERAKIS

Grâce à la technique de diffusion de rayons X, les chercheurs ont pu analyser la structure des molécules mais aussi leur dynamique. Ils ont ainsi mis en évidence que, pour une température comprise entre 110 et 125 kelvins, la phase amorphe de haute densité se transforme d'abord en phase liquide de haute densité puis en phase liquide de basse densité avant de devenir une phase amorphe de basse densité. L'eau liquide existe donc bien sous deux formes, comme les chercheurs le pensaient. Au-dessus de 126 kelvins, les deux formes d'eau liquide coexistent. La prochaine étape consistera à étudier leurs propriétés et notamment à déterminer si elles diffèrent par leur réactivité. ■

RONOVAN THIÉRAUD

F. Perakis et al., *PNAS*, vol. 114(31), pp. 8193-8198, 2017

LE YOGA RÉGULE
LES GÈNES

Yoga, méditation, tai chi... Les bienfaits de la médecine corps-esprit contre l'anxiété ou la dépression sont aujourd'hui bien établis. Mais comment ça marche ?

Une partie d'un effet anti-inflammatoire, obtenu en régulant l'expression de certains gènes, suggère une étude menée par Ivana Buric, de l'université de Coventry, au Royaume-Uni, et ses collègues.

Lors d'un événement stressant, l'organisme déclenche souvent une inflammation. Quand celle-ci devient chronique, elle augmente le risque de nombreuses pathologies, notamment psychiatriques. En effet, les cytokines, des protéines produites lors de l'inflammation, activent des zones cérébrales qui accentuent le sentiment de menace. Avec pour conséquence potentielle un état d'anxiété et d'hypervigilance, susceptible de dégénérer en dépression.



ILLUSTRATION : J. PERAKIS

La médecine corps-esprit agit au niveau cellulaire, où elle exercerait un effet anti-inflammatoire.

Grâce à l'analyse de 18 études sur le sujet, les chercheurs ont montré que la médecine corps-esprit ralentit la chaîne de fabrication des cytokines, en influant sur la transcription des gènes qui les codent. Ainsi, elle réduirait l'inflammation provoquée par un stress chronique, ce qui entraînerait des bénéfices sur l'humeur. ■

GUILLAUME JACQUEMONT

Frontiers in Immunology, en ligne, 16 juin 2017

EN IMAGE

UNE GOUTTE AUX ALLURES SATURNIENNES

Vous pensez voir une nouvelle photographie de Saturne et ses anneaux? Détrompez-vous, il s'agit d'une goutte d'huile de silicone suspendue dans un bain d'huile de ricin.

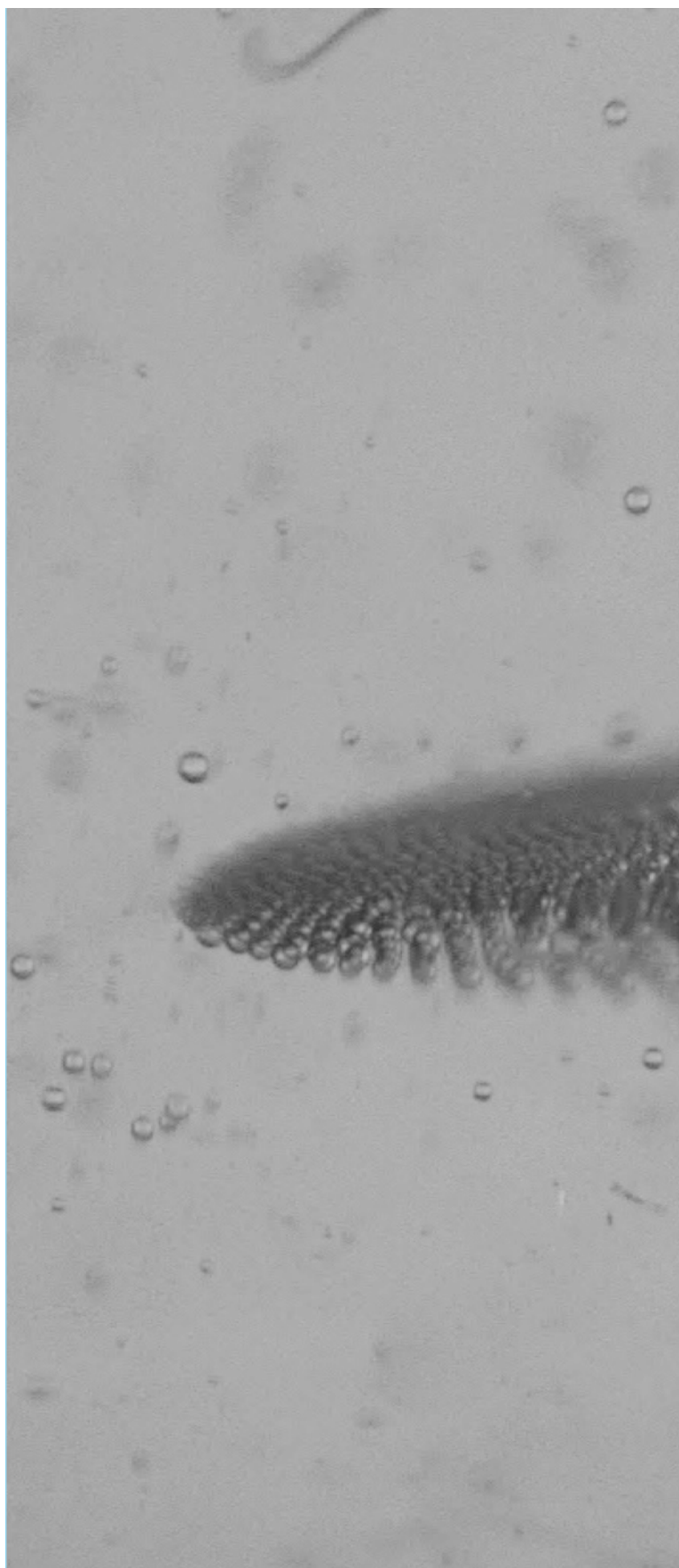
Sous l'influence d'un champ électrique uniforme, cette goutte s'amincit aux pôles et grossit à l'équateur où l'interface s'étale en un film mince, qui se décompose en «anneaux de Saturne», puis en microgouttelettes, visibles ici sur les anneaux les plus excentrés.

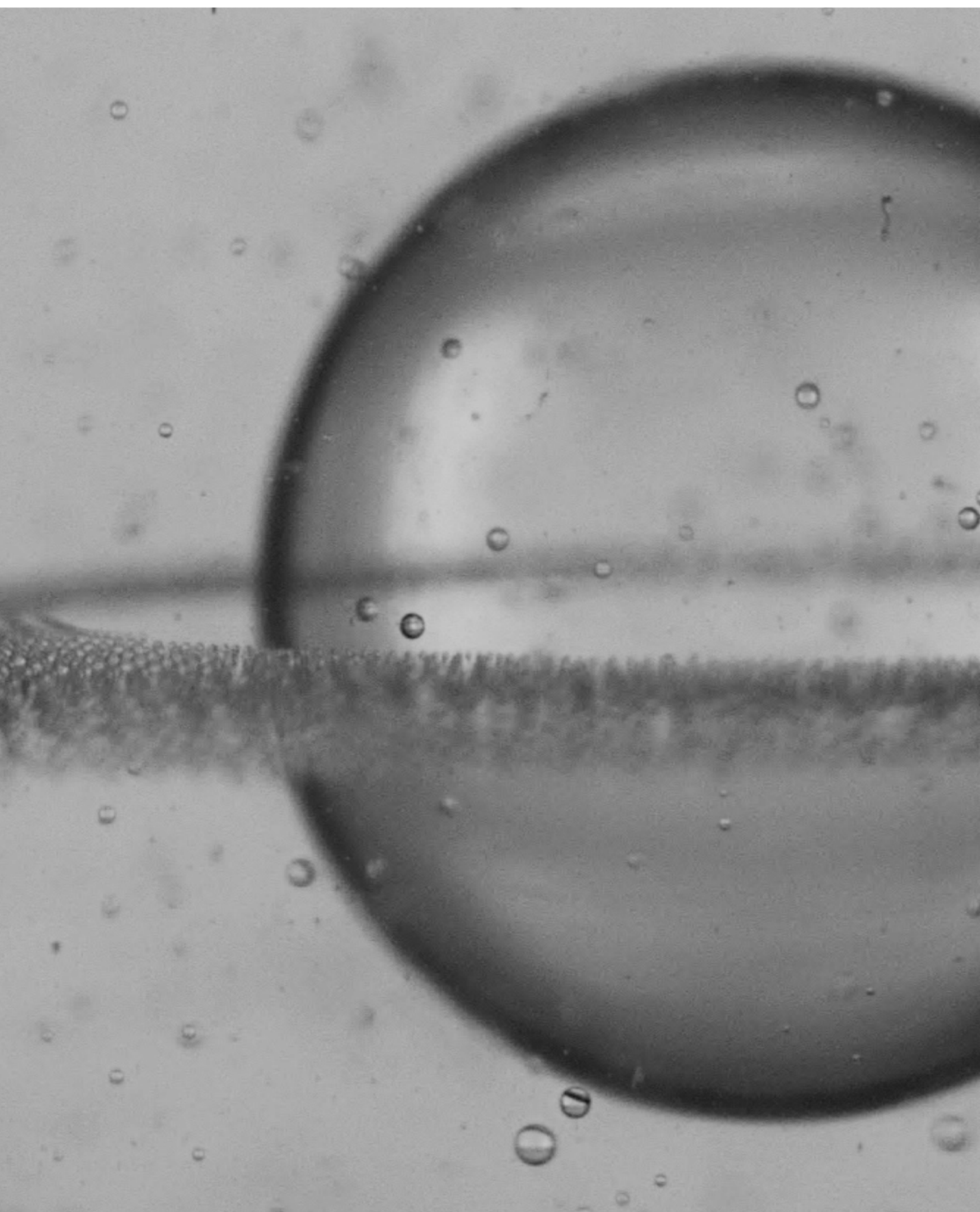
Lorsqu'il existe un contraste de conductivité suffisant entre les deux fluides – l'huile de silicone et l'huile de ricin –, un flux d'ions (nommé flux électrohydrodynamique) naît à la surface de la goutte. Ce flux circule des pôles vers l'équateur ou inversement, selon la différence de conductivité. Quentin Brosseau et Petia Vlahovska, de l'université Brown, aux États-Unis, ont dopé le bain d'huile de ricin avec des ions dissous, dans l'intention de modifier sa conductivité et donc d'influer sur la circulation du flux vers l'équateur.

C'est une seconde après l'activation du champ électrique que la convergence des flux vers une ligne de stagnation équatoriale entraîne la formation des anneaux. Pourquoi des anneaux? Cela reste pour l'instant un mystère, car «il n'est pas intuitif qu'une goutte se déstabilise de cette façon. Habituellement, elle prend la forme d'une couronne, comme pour une goutte qui tombe au sol», explique Quentin Brosseau. Affaire à suivre... ■

C. D.

Q. Brosseau et P. M. Vlahovska, *Physical Review Letters*, vol. 119, article 034501, 2017





CLIMATOLOGIE

UNE AUTRE MENACE SUR LA COUCHE D'OZONE

Depuis l'interdiction d'utiliser des chlorofluorocarbones (CFC) adoptée à Montréal en 1987, le «trou» de la

couche d'ozone stratosphérique, qui nous protège des rayons ultraviolets, est à nouveau menacé. Le responsable est cette fois le dichlorométhane (CH_2Cl_2), un solvant répandu, qui n'a pas été pris en compte par le protocole de Montréal à cause de sa courte durée de vie dans l'atmosphère. Or sa concentration a presque doublé entre 2004 et 2014. Les émissions sont désormais d'environ un million de tonnes par an. Lorsque ce composé atteint la stratosphère, il libère des atomes de chlore qui réagissent avec les atomes d'oxygène de l'ozone (O_3) et le dégrade.

Ce processus vient concurrencer la formation naturelle de molécules d'ozone dans la stratosphère. Ainsi, la reconstitution de la couche d'ozone, qui devrait revenir à son état

l'avant 1980 d'ici environ 2050, pourrait être retardée. Or en 2014, des chercheurs britanniques ont suggéré que 3 % de l'ozone détruit par le dichlorométhane. Sa contribution, qui était de 1,5 % en 2010, a doublé en seulement six ans.

Pour évaluer la menace que fait peser le dichlorométhane sur la stratosphère, l'équipe de Ryan Hossaini, de l'université de Lancaster, au Royaume-Uni, a effectué des simulations informatiques. Dans le scénario où la concentration du dichlorométhane continue d'augmenter à un rythme similaire à ces dernières années, le rétablissement de la couche d'ozone sera retardé d'environ trente ans.

Pour préserver la couche d'ozone, le traitement du dichlorométhane est un nouveau défi technique et politique à ne pas négliger. ■

R.D.

R. Hossaini et al., *Nature Communications*, vol. 8, article 15962, 2017

EN BREVI

LA FLEUR ANCESTRALE

Les plantes à fleurs seraient apparues

il y a environ 170 millions d'années, mais leur origine et leur évolution restent mal connues. En analysant des données génétiques de différentes espèces, Hervé Sauquet, de l'université Paris-Sud, et ses collègues ont proposé un modèle pour la fleur ancestrale, qui serait à l'origine de toutes les autres. Elle aurait été hermaphrodite. Elle aurait aussi compté plusieurs verticilles (cycles concentriques) d'organes ressemblant à des pétales et qui auraient été organisés par groupes de trois. On retrouve ces verticilles trimères dans près de 20 % des fleurs actuelles. Mais le registre fossile des plantes à fleurs restant incomplet, de nombreuses questions demeurent ouvertes.

l'action de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs
formation
entreprises

**Organisme
de formation continue**



230 formations technologiques courtes proposées par le CNRS dans ses laboratoires de recherche pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens



Domaines de formation
Big data, sciences de l'ingénieur, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, urbanisme... et plus encore

de **1300 stagiaires** formés chaque année



Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

@CNRS-CE

NEUROSCIENCES

LA NICOTINE STRESSE

Les fumeurs en sont persuadés: griller une cigarette détend. Pourtant, la plupart d'entre eux sont stressés! Peut-

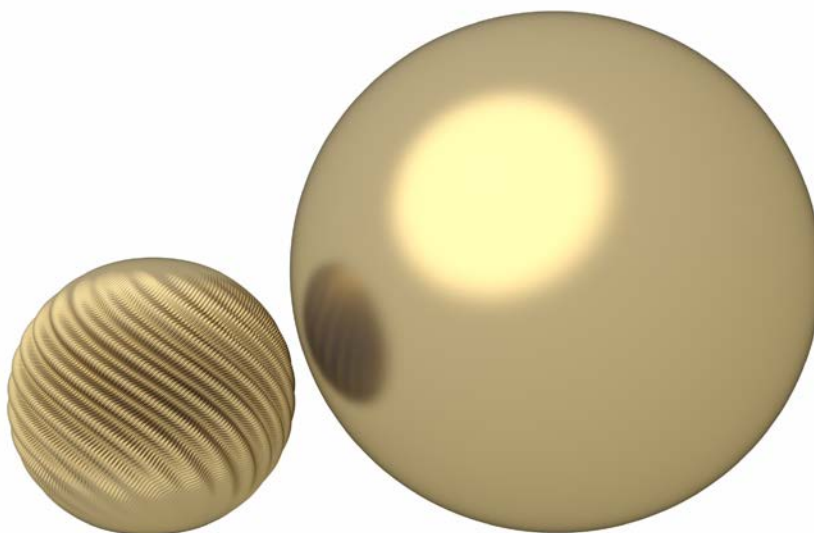
être? Des chercheurs ont étudié le stress. C'est ce que viennent de montrer des chercheurs français chez des souris soumises à un stress social, c'est-à-dire aux attaques répétées de congénères plus forts. Ces rongeurs « anxieux » ne sont plus stressés face à une souris inconnue quand on inhibe leurs récepteurs nicotiniques, alors que ceux ayant reçu une solution nicotinique le deviennent après une seule agression. Il en est de même si les chercheurs stimulent certains récepteurs nicotiniques de leur circuit cérébral de récompense. Stress et plaisir seraient liés, la nicotine favorisant les deux. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

Morel et al., *Molecular Psychiatry*, en ligne 25 juillet 2017

MATHÉMATIQUES

SPHÈRE RÉDUITE, MAIS DISTANCES INCHANGÉES



La sphère initiale (à droite) a été réduite (à gauche) de telle sorte que la distance entre deux points quelconques de sa surface reste inchangée.

ÉCOLOGIE

L'EXTINCTION S'ACCÉLÈRE

Chez 22 % des espèces de vertébrés, les populations seraient en diminution marquée. En ne comptant que les

Gerardo Ceballos, de l'université autonome du Mexique, et ses collègues sont arrivés à ce constat en examinant près de 27 600 espèces de vertébrés, soit environ la moitié des vertébrés connus à ce jour.

Outre cette tendance générale, les chercheurs ont mis en lumière que ce phénomène touche aussi les espèces très répandues. Et, tout aussi inquiétant, en analysant plus précisément les habitats de 177 espèces de mammifères pour lesquels on dispose de données détaillées, ils ont noté que ces animaux ont perdu 30 % ou plus de la superficie de leur habitat, et 40 % de ces espèces en ont perdu plus de 80 %.

Nous ne « disposons que d'une petite fenêtre de temps pour réagir, deux ou trois décennies maximum », avertissent les auteurs. ■

D.T.

Ceballos et al., *PNAS*, vol. 114(30), pp. E6089-E6096, 2017

Faire entrer une sphère rigide, telle la Terre, dans une balle de tennis, tout en s'assurant que la distance entre deux points quelconques de la surface de la planète reste la même... cela paraît impossible! Pourtant, c'est bien ce qu'ont mathématiquement réalisé les membres du projet Hévée des universités de Lyon et de Grenoble. Réduire le volume occupé par une sphère rigide qui ne peut être ni étirée ni contractée, tout en conservant les longueurs à sa surface (on parle de déformation

isométrique), est un problème mathématique complexe. En appuyant dessus pour réduire son volume, la surface lisse de la balle se froisse: elle s'enfonce et fait apparaître des coins et des arêtes. La question est donc de savoir s'il est possible de réaliser une réduction isométrique de la sphère en préservant un aspect assez lisse, sans arêtes.

En 1954, John Nash a suggéré qu'il était possible d'obtenir des sphères réduites et lisses. Cependant, de nombreux obstacles empêchaient alors d'imaginer à quoi pourraient ressembler ces objets. Plus tard, Benoît Mandelbrot et Mikhaïl Gromov ont fourni les outils mathématiques nécessaires à la construction de sphères réduites. Pour y parvenir, l'équipe Hévée a décomposé la sphère initiale en trois parties, les deux calottes polaires et la bande équatoriale. La taille des calottes est adaptée pour les faire rentrer dans une plus petite sphère sans les déformer; c'est la bande équatoriale qui va subir les transformations isométriques, en étant plissée de façon répétée et suivant une procédure précise.

Enfin, existe-t-il une limite à la réduction d'une sphère par la « recette » utilisée par les membres du projet Hévée? La réponse est non. Dans le modèle des chercheurs, le facteur de réduction était de 2, mais celui-ci aurait pu être beaucoup plus important. Avec une bande équatoriale beaucoup plus plissée, il aurait été possible de faire rentrer la Terre dans une balle de tennis... ■

D.T.

Barrios et al., *Foundations of Computational Mathematics*, en ligne 6 juillet 2017

GEOSCIENCES

UNE NOUVELLE PISTE POUR PRÉDIRE LES ÉRUPTIONS?

Une technique permettant de déduire la vitesse des ondes sismiques à partir du bruit de fond sismologique d'un volcan fournirait un moyen d'anticiper une éruption.

De nombreux volcans sont actuellement en activité dans le monde, mais comment anticiper leurs éruptions? La technique classique consiste à enregistrer l'activité sismique aux alentours d'un volcan à la recherche de petits tremble-

ments de faible amplitude à court terme. Mais ces microséismes sont souvent indétectables, car ils sont atténués avant même d'atteindre les capteurs en surface. Et lorsqu'ils sont enregistrés, il est souvent déjà trop tard pour évacuer les villes voisines.

En étudiant le volcan Kilauea, à Hawaï, une équipe de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, menée par Clare Donaldson, a développé une méthode prometteuse pour prédire des éruptions volcaniques. Le principe est d'utiliser la vitesse sismique, la vitesse à laquelle se propagent les ondes sismiques dans le volcan.

Jusqu'à alors, la vitesse sismique ne pouvait être mesurée qu'en produisant des ondes artificielles à l'aide d'une source explosive. Le temps mis par l'onde pour se propager jusqu'au capteur, rapporté à la distance entre celui-ci et la source, donnait la vitesse sismique. Mais cette technique ne permettait que des mesures ponctuelles.

Les mesures passives de la vitesse sismique, sans source explosive, étaient jusqu'ici impossibles en raison du bruit de fond – toutes les microvibrations du sol, qu'elles soient d'origine naturelle ou artificielle. L'équipe anglaise a réussi à exploiter directement ce bruit ambiant. Un traitement informatique permet de calculer la fonction de corrélation des bruits enregistrés par deux capteurs installés en deux endroits de la surface du volcan puis d'en extraire le signal des ondes sismiques allant d'un point à l'autre. De façon plus imagée, si deux personnes essaient de se saluer d'un bout à l'autre d'un hall de gare, elles ne s'entendent pas, en raison du brouhaha ambiant. Mais après calcul de la corrélation des signaux entre les deux points où sont situés les individus, il est possible de soustraire le bruit et de récupérer uniquement le signal utile: «Bonjour!»

En appliquant cette méthode à tous les capteurs, l'équipe a visualisé les ondes sismiques



qui parcourent le volcan et a ainsi évalué la vitesse sismique moyenne de façon continue dans le temps.

Les chercheurs ont suivi pendant plusieurs années cette vitesse sismique dans le volcan Kilauea. Les résultats ont ensuite été confrontés aux observations des déformations de la surface du volcan sur la même période. «C'est la première fois que nous sommes capables de comparer la vitesse sismique et ces déformations sur une si longue période. Leur bonne correspondance suggère que notre approche pourrait être un nouveau moyen de prédire les éruptions volcaniques», se félicite Clare Donaldson.

Effectivement, lorsqu'un volcan est sur le point d'entrer en éruption, ses roches se dilatent sous l'effet de la hausse de température et de pression, d'où une déformation en surface. «Cette dilatation est un bon indicateur d'une future éruption», précise Florent Brenguier, du laboratoire ISTerre de l'université Grenoble-Alpes. Or, d'après les résultats de l'équipe de Clare Donaldson, comme une dilatation des roches s'accompagne d'une diminution de la vitesse sismique, les chercheurs disposeraient là d'un nouvel indicateur des risques d'éruption. ■

D. T.

Clare Donaldson *et al.*, *Science Advances*, vol. 3, n° 6, e1700219, 2017

Le Kilauea, à Hawaï, est l'un des volcans les plus étudiés du monde en raison de son activité importante.

DU MERCURE
DANS L'ARCTIQUE

La faune de l'océan Arctique, pourtant éloignée des principales sources de pollution, présente des contaminations élevées au mercure. Une équipe franco-américaine a étudié en Alaska l'origine de ce paradoxe. Daniel Obrist et ses collègues ont montré que la flore et les sols de la toundra absorbent le mercure à l'état gazeux de l'atmosphère tout au long de l'année. Ensuite, lors du dégel au printemps, le métal toxique est transporté par les fleuves de la région dans l'océan Arctique.

STRATOSPHERE
HOT ET ANTARCTIQUE

Un exoplanète WASP-121b est une « mini-terre chaude » une géante gazeuse proche de son étoile et donc très chaude. Une telle planète est-elle pourvue d'une stratosphère, zone de l'atmosphère où la température augmente avec l'altitude ? Thomas Evans, de l'université d'Exeter, au Royaume-Uni, et ses collègues ont confirmé la présence de cette stratosphère. Pour ce faire, ils ont analysé, grâce au télescope spatial Hubble, l'émission infrarouge des molécules de l'eau de l'atmosphère de WASP-121b.

FESSES ROMAINES
DÉNUDÉES

Les archéologues de l'Inrap fouillent tout un quartier de la Vienne romaine (Rhône). Répartis sur 7 000 mètres carrés, ce qui est exceptionnel en milieu urbain, les vestiges retrouvés – somptueuses maisons, décors en mosaïque, pavements en marbre, mobilier... – sont très bien conservés, parce qu'ils avaient été enfouis à la suite d'un incendie. Une mosaïque représente Bacchus entouré par un cortège de bacchantes et de satyres ; une autre montre le dieu Pan en train d'enlever Thalie, dont les fesses sont dénudées.

L'AMPHIBIEN-ESPADON DU TRIAS

Un amphibien triasique au long nez.

Étonne les paléontologues. Au long nez ? « Le très long rostre de cet animal »

ère dire J.-Sébastien Steyer, du CNRS et du Muséum à Paris. « Il s'agit d'un membre d'un genre connu à la fois au Pakistan et dans l'île norvégienne du Spitzberg. Le fait que des fossiles de ce genre, nommé *Aphaneramma*, aient été retrouvés en des endroits aussi éloignés trahit sa répartition mondiale au début du Trias. »

En effet, il y a quelque 250 millions d'années, presque tous les continents étaient rassemblés au sein d'une grande terre – la Pangée. Toutefois, celle-ci était en train de se partager en deux blocs (le Gondwana et des terres septentrionales) entre lesquelles avançait la Téthys, un océan aujourd'hui disparu. L'animal étudié par l'équipe de J.-Sébastien Steyer était manifestement l'un des prédateurs de la Téthys, car, même s'il a été acheté sur un marché aux fossiles par un paléontologue amateur (qui en a fait don à l'université d'Antananarivo), les chercheurs savent qu'il provient de sédiments d'origine marine du Trias de Madagascar. Ils l'ont nommé *Aphaneramma gavialimimus* parce que son long rostre leur rappelle le gavial du Gange. Mais ce crocodilien chasse les poissons dans les grands fleuves asiatiques, tandis qu'*Aphaneramma gavialimimus* vivait dans la mer. Alors que le



Le crâne effilé d'*Aphaneramma gavialimimus*, très hydrodynamique, traduit une adaptation à la nage rapide.

rostre du gavial représente moins de 8 % de sa longueur, celui d'un *Aphaneramma gavialimimus*, qui mesure deux à trois mètres (estimation des chercheurs), en représente de 13 à 20 %. Par ailleurs, le rostre très effilé pourfendeur des eaux téthysiennes suggère que l'animal pouvait atteindre une grande vitesse de pointe si nécessaire. Il s'agissait donc vraisemblablement d'un chasseur de poissons qui courait ses proies. Aujourd'hui, des requins, les thons, les marlins et l'espadon font de même. L'espadon, qui doit son nom à son rostre semblable à une lame d'épée, atteint par exemple une vitesse de pointe de 109 kilomètres par heure. Quelle était la vitesse d'*Aphaneramma gavialimimus* ? ■

P.S.

J. Fortuny et al., *Journal of Systematic Paleontology*, en ligne le 29 juin 2017.

LES CORBEAUX
ANTICIPENT

Certains n'hésitent pas à comparer les capacités cognitives des corvidés à celles des grands singes. D'autres

ations à leur environnement pour qualifier, par exemple, leurs capacités à cacher puis retrouver leur nourriture. Mais Can Kabadayi et Mathias Osvath, de l'université de Lund, en Suède, ont montré que les corbeaux savent anticiper et préparer une action future, résister à la frustration et apprendre à se servir d'outils, égalant les compétences d'un jeune enfant ou d'un grand singe.

Les chercheurs ont appris à des grands corbeaux (*Corvus corax*) à utiliser des outils (des cailloux) sur une machine ou à troquer avec des humains des jetons contre une récompense. Or cette espèce n'utilise pas naturellement des outils. Le défi suivant a consisté à faire choisir



Le grand corbeau (*Corvus corax*) est capable de planifier une action pour obtenir une récompense.

l'outil ou le jeton parmi différents objets et à ne présenter la machine ou l'humain que plus tard. Dans 9 cas sur 10, les corbeaux sélectionnent l'objet qui leur apporte une récompense. Plus fort, ils sont capables de préférer ces objets à une récompense immédiate, mais moins importante que celle qu'ils auront plus tard. ■

MARTIN TIANO

Can Kabadayi et M. Osvath, *Science*, vol. 357, pp. 202-204, 2016.

ASTROPHYSIQUE

LE CYCLE DU SOLEIL ENFIN COMPRIS

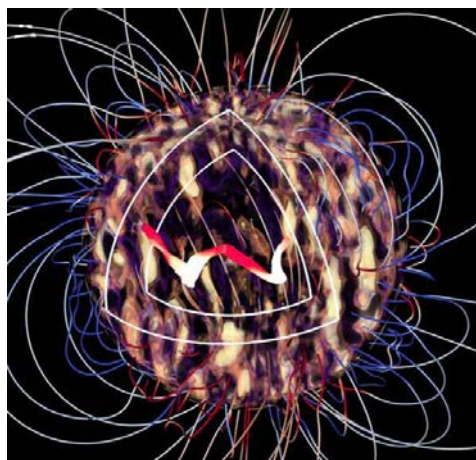
Le Soleil oscille entre des périodes de forte et de faible activité, qui influent notamment sur le nombre de taches à sa surface et son rayonnement. Au plus fort de son activité, tous les 11 ans environ, les éruptions solaires plus fréquentes et énergétiques peuvent

le distribution d'électricité sur Terre. Il est donc important de bien comprendre la dynamique du Soleil et les mécanismes à l'origine de ses cycles.

Ces derniers sont intimement liés au champ magnétique solaire, dont la polarité s'inverse selon une périodicité d'environ 11 ans. Ce phénomène cyclique a aussi été observé pour d'autres étoiles ayant les mêmes caractéristiques que le Soleil et appartenant donc à la même classe. Mais la durée des cycles de ces astres varie entre un an et plusieurs dizaines d'années. Il était difficile de comprendre ces différences. De surcroît, certains astrophysiciens se demandaient si le Soleil était vraiment représentatif de sa classe stellaire. Pour clarifier la situation, Antoine Strugarek, du CEA Paris-Saclay et de l'université de Montréal, et ses collègues ont développé des simulations numériques, qui parviennent à rendre compte de la dynamique interne du Soleil et à expliquer son cycle de 11 ans.

Le champ magnétique d'une étoile est engendré par le mouvement de convection turbulente du plasma extrêmement chaud (le gaz ionisé) au cœur de l'astre. Dans un modèle stellaire tridimensionnel, l'équipe d'Antoine Strugarek a reproduit les processus magnétohydrodynamiques qui créent les écoulements de plasma et les champs magnétiques au sein des étoiles. Dans la simulation, comme dans une vraie étoile, ces phénomènes s'influencent mutuellement, et ces rétroactions sont essentielles pour reproduire fidèlement le comportement de l'astre.

Les chercheurs ont simulé des étoiles d'âge et de masse comparables au Soleil, mais présentant des périodes de rotation comprises entre 14 et 29 jours et une luminosité proche de celle du Soleil. La luminosité caractérise la quantité d'énergie produite au cœur de l'étoile et transportée jusqu'à la surface, par rayonnement et par convection. Les chercheurs ont ainsi montré que la durée des cycles stellaires dépend de ces deux facteurs : elle diminue quand la période de rotation ou la luminosité augmentent. Les deux facteurs peuvent être combinés et représentés par un unique paramètre, le nombre de



Simulation numérique du Soleil reproduisant la dynamique du champ magnétique de l'étoile et ses cycles de 11 ans.

Rossby. Celui-ci caractérise l'influence de la rotation de l'étoile sur le système, et correspond au rapport des forces d'inertie et de Coriolis. Antoine Strugarek et ses collègues ont montré que la durée du cycle est inversement proportionnelle au nombre de Rossby.

Grâce aux simulations, ces chercheurs ont compris comment le champ magnétique altère la vitesse d'écoulement à grande échelle du plasma en rotation. Ces variations ont une amplitude faible, de l'ordre de 1 %, mais elles suffisent pour provoquer l'inversion du champ magnétique.

Les chercheurs ont comparé leurs résultats numériques avec les données d'une vingtaine d'étoiles de type solaire. La durée du cycle de ces étoiles semble suivre la même formule que celle déduite des simulations. Néanmoins, quelques écarts sont observés. Ils sont peut-être dus à l'incertitude sur le calcul de la luminosité de ces étoiles, à l'existence de plusieurs cycles agissant simultanément au sein d'un même astre ou au fait que l'on connaît mal la taille de la région de l'étoile où le transfert d'énergie s'effectue par convection et non par rayonnement. En utilisant des données plus précises et en affinant leurs simulations, les chercheurs espèrent encore mieux comprendre le phénomène de cycle stellaire. Mais cette étude semble l'ores et déjà confirmer que le Soleil est bien une étoile de type... solaire! ■

JEAN BAILLY

Strugarek et al., Science, vol. 357, pp. 185-187, 2011

EN BREVE

INVASION D'ALGUES DANS LA BALTIQUE

Lorsque la population des grands poissons

producteurs diminue dans la mer Baltique, ceux-ci ne sont plus là pour manger les petits poissons qui, par conséquent, pullulent et mangent davantage de crustacés. Ces derniers ne contrôlent alors plus la prolifération des algues filamenteuses dont ils sont friands. Ces algues ont ainsi envahi certaines côtes. En décryptant cette chaîne trophique, l'équipe de Serena Donadi, de l'université suédoise des sciences agricoles, a compris pourquoi la qualité des eaux a baissé.

LES ÉVALUÉS DE LA CIVILISATION

Dans ses ans, une femme turco-italienne a trouvé des artefacts en nombre, dont des jarres. L'une d'elles, ronde et dotée d'une unique anse annulaire, les a étonnés : son ventre porte le dessin d'un visage, qui ressemble au plus basique de nos smileys, c'est-à-dire à :) ... Les archéologues pensent que le pot a été décoré ainsi parce qu'il servait à stocker et à boire une boisson sucrée. Peut-être ressemblait-elle à du charbat, à base d'herbes, de pétales de fleurs et de fruits, très prisé au Proche-Orient.

DU SANG CHAUD SÈRUS CHAUD

La capacité de produire une chaleur corporelle élevée serait apparue chez les thérapside, les ancêtres reptiliens des mammifères. Mais quand, plus précisément ? Christophe Décuyer, de l'université Lyon 1, et ses collègues ont étudié la composition isotopique de l'oxygène dans les os de 63 fossiles de thérapside appartenant à 22 espèces différentes. L'oxygène 16 et l'oxygène 18 se fixent différemment aux os (selon la température). Conclusion : les premières espèces à sang chaud seraient apparues il y a 252 à 259 millions d'années.

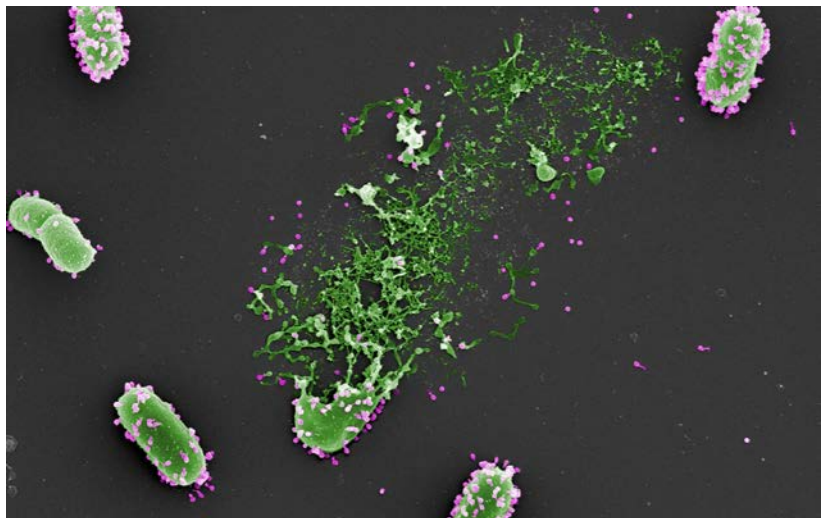
ÊTRE GÉNÉREUX REND HEUREUX

Donner fait du bien. Pourquoi? Sovoung Park, de l'université de Lübeck, et ses collègues ont demandé à des volontaires de donner à un tiers de leur salaire par semaine pendant un mois, soit pour eux, soit pour des proches. Puis ils ont enregistré par IRM leur activité cérébrale pendant qu'ils devaient choisir s'ils donnaient ou non – fictivement – de l'argent à un individu. Résultat: les personnes qui se sont engagées à dépenser leurs sous pour autrui ont été, sous IRM, plus généreuses que les autres et sont reparties plus heureuses du laboratoire. Dans leur cerveau, la fonction temporopariétale, associée à la générosité, s'activait davantage, et plus ces sujets donnaient de l'argent, plus la connexion entre cette jonction et le striatum, associé au bonheur, était stimulée. Bonheur et générosité sont donc liés *via* une modulation du striatum par la fonction temporopariétale. ■

S.-L.

Park et al. *Nature Communications*, en ligne, 1 juillet 2017

PHAGOTHÉRAPIE: LE RÔLE DU SYSTÈME IMMUNITAIRE



Des bactéries (en vert) assaillies et détruites par des bactériophages (en violet) sous l'objectif

Attacker les bactéries avec leurs propres virus, les bactériophages ou «phages», par ailleurs inoffensifs pour l'homme proposée il y a cent ans, cette approche – la phagothérapie – est devenue marginale avec l'avènement des antibiotiques. Mais aujourd'hui, avec la montée alarmante des résistances aux antibiotiques, l'intérêt pour cette piste se renouvelle en Europe. Jusqu'à présent, cependant, les données manquaient pour comprendre comment

les phages agissent, et comment ils interagissent avec le système immunitaire. Ils ciblent spécifiquement, mais chez l'animal et *a fortiori* chez l'homme, le contexte est différent et l'importance de la réaction de l'hôte était jusqu'à présent négligée», explique Laurent Debarbieux, de l'institut Pasteur. Or son équipe vient de montrer que l'efficacité de la phagothérapie dépend du système immunitaire du patient.

Les chercheurs ont mené une double approche qui combine un modèle animal, pour évaluer l'efficacité du traitement *in vivo*, et une modélisation mathématique visant à mieux cerner l'importance du statut immunologique du patient dans les chances de réussite d'une telle thérapie. L'équipe a utilisé comme modèle la bactérie *Pseudomonas aeruginosa*, impliquée dans des infections respiratoires.

Les chercheurs ont ainsi montré que chez des souris dont l'immunité fonctionne bien, le traitement est couronné de succès. Le système immunitaire inné, le premier sollicité en cas d'infection, prend notamment en charge les bactéries qui deviennent résistantes aux phages. Toutefois, ce n'est plus le cas chez des souris génétiquement modifiées pour que leur système immunitaire soit moins performant, en particulier quand la population de neutrophiles – des globules blancs surtout impliqués dans l'immunité innée – est réduite.

Les simulations numériques confirment qu'une activation de la réponse innée à hauteur de 50 % de celle observée chez un individu sain est nécessaire pour que le traitement soit efficace. Les neutrophiles seraient indispensables pour éradiquer tant les bactéries résistantes aux phages que les autres. ■

NOËLLE GUILLON

Boach et al. *Cell Host and Microbe*, vol. 22(1), pp. 38-47, 2017

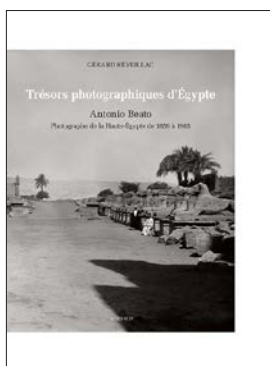
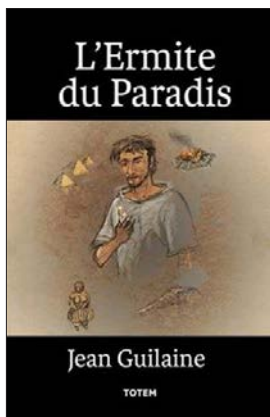
ADHÉSIF INSPIRÉ DU POULPE

Comment concevoir une surface adhésive, simple à fabriquer, aussi efficace sous l'eau qu'à sec? En s'inspirant des

Gyul Baik, de l'université Sungkyunkwan, en Corée du Sud, et ses collègues. Ces ventouses ont la particularité de porter, dans leur cavité, une protubérance ellipsoïde qui participe à l'adhérence, mais dont le rôle était mal connu. Ayant reproduit cette structure sur un film en polyuréthane-acrylate, les chercheurs ont comparé son efficacité à celle de ventouses présentant d'autres géométries. Si elles se valent à sec, seules celles bio-inspirées fonctionnent dans l'eau. Les chercheurs ont alors étudié l'action de la protubérance. Lors du contact d'une ventouse et d'un support, la pression évacue une grande partie de l'eau entre les deux. La protubérance canalise le reste du liquide dans le fond de la ventouse et crée un espace vide où s'exerce une grande force de succion, d'où l'adhérence. ■

M.T.

Baik et al. *Nature*, vol. 546, pp. 396-404, 2017



GEOSCIENCES

POURQUOI LA TERRE TREMBLE

Pascal Bernard

Belin, 2017

160 pages, 21 euros

Cet ouvrage est la réédition d'un livre profondément remanié d'un livre

de 2003. Il incorpore les dernières avancées de la science sismologique, notamment grâce à l'étude des mégaséismes de Sumatra et du Japon à l'origine des tsunamis catastrophiques de 2004 et 2011. Son principal intérêt est de nous faire entrer de plain-pied dans le monde de la recherche: on y trouvera ainsi les découvertes et les interrogations nées des observations des quinze dernières années. Pour mieux nous mettre en contact avec la dynamique d'une recherche confrontée aux enjeux des catastrophes telluriques, l'auteur emploie les mots et les images de tous les jours et les accompagne de croquis qu'il a dessinés. Il parvient ainsi à nous faire comprendre «avec les mains» comment un phénomène apparemment aussi aléatoire et imprévisible qu'un séisme peut naître, et pourquoi, où et quand il apparaît.

Aléatoires et imprévisibles, les séismes? C'est pour faire face à cette difficile question qu'avec la rigueur scientifique qui se doit, l'auteur nous entraîne vers la quête passionnante de nouveaux signes potentiellement précurseurs des grands tremblements de terre. C'est en particulier l'analyse des faibles signaux noyés dans le «bruit de fond» des enregistrements qui est fascinante. Par ailleurs, il rappelle et actualise ses remarques de 2003 sur ceux qui prétendent savoir prédire ces tremblements de terre, mais dont la qualité première est en fait de savoir se faire écouter par les médias et, parfois malheureusement, par les autorités chargées de la sécurité civile. C'est l'une des grandes qualités de ce livre que de nous faire réfléchir à la science de la prévision en général, et ce bien au-delà du champ des tremblements de terre.

Les lecteurs découvriront ainsi dans cet excellent ouvrage toute la richesse de notre pensée mouvante sur les phénomènes telluriques et sur leurs conséquences.

MICHEL CARA / INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE STRASBOURG

PREHISTOIRE

L'ERMITE DU PARADIS

Jean Guilaine

Totem, 2017

320 pages, 19,50 euros

Un préhistorien meurt, il va au paradis des agnostiques. Là, on lui donne le choix de l'environnement où passer son séjour éternel. Naturellement, il choisit son paysage de prédilection, qui fut celui de sa vie et de sa carrière: un endroit méditerranéen sec et caillouteux, au soleil doux et à la végétation de garrigue odorante. Dans ce site isolé et paisible, ce n'est pas un hasard si son seul proche voisin est... un homme de l'âge du Bronze qui a lui aussi choisi de revenir sur les sentes aimées de sa vie.

Cette rencontre en est vraiment une, car l'archéologue qui a collectionné toute sa vie les objets desséchés laissés par l'homme du passé et arpenté les sites mêmes où il a vécu ne résiste pas à demander à Ato, cet homme d'il y a cinq millénaires, de lui raconter sa vie: une vie d'aventures, faite de périples dans la Méditerranée au service d'un prince pour collecter des trésors d'ivoire. Vols, pillages de navires et de sépultures, amitiés, conquêtes féminines... Cette odyssee nous fait voyager sur les pas d'Ato d'Égypte en Tunisie, du Liban aux îles grecques et jusqu'aux rivages de Troie. Au hasard du voyage, le lecteur identifie des sites bien connus, tels que l'île de Lesbos ou Malte, l'île aux temples en forme de trèfle», avec ses «déesses», gigantesques statues de femmes aux formes opulentes.

Ce récit est écrit d'une plume alerte par Jean Guilaine, du Collège de France, spécialisé dans l'étude des civilisations néolithiques et protohistoriques du pourtour méditerranéen: «J'avais couru tout au long de ma carrière après des objets, des monuments, des céramiques, des ossements. Lui m'avait tout simplement conté la vie, la sienne, mais aussi celle de ceux qu'il avait côtoyés.» Faire vivre dans tous ses détails et toutes ses couleurs le passé auquel il n'a eu accès que par des bribes, n'est-ce pas le rêve de tout archéologue?

CLAUDINE COHEN / EHESS, PARIS

PENSER L'ÉVENTUEL

Nicolas Bouleau

Quae, 2017

114 pages, 21 euros

S'il se laisse rebuter par ce livre qui part dans tous les sens et (malheureusement) le lecteur manquera des réflexions enrichissantes. En voici quelques-unes.

Face à une situation embrouillée,

nous attendons des progrès de la science qu'ils l'éclaircissent. En fait, la science ne tranche pas entre des interprétations qui s'opposent. Elle se nourrit de leurs conflits plus qu'elle ne les résorbe. «Les diverses interprétations sont le moyen principal dont on dispose pour avancer dans la complexité.» En outre, l'influence de la science sur le monde, *via* la technique, est désormais rapide. On ne peut plus séparer la science du contexte dans lequel elle se déploie. Elle contribue à faire évoluer la réalité qu'elle explore. En cela, elle la complexifie.

«Ce qui est fait en laboratoire

est destiné à fournir des connaissances sur ce qu'on fera en dehors.» Mais ce qu'on fera dehors s'insérera dans un contexte social dépendant de nombreuses circonstances imprévisibles par la science. Prétendre, comme les positivistes, qu'une loi établie en laboratoire a valeur générale est donc abusif. La notion de loi fait croire à une pérennité qui n'est pas. Moins que de lois, la science est affaire d'interprétations, et a besoin de leur diversité. C'est ce que l'auteur nomme l'éventualisme.

Impossibilité à maîtriser, la science

ne saurait rendre le contexte moins menaçant. Elle n'a pas vocation à rassurer. Loin d'être toujours mauvaises conseillères, les craintes sont un matériau de base de la connaissance. À notre époque, ce sont les observations inquiétantes qui sont vraiment intéressantes. Alors, la science ne doit pas avoir peur des craintes!

DIDIER NORDON / ESSAYISTE

TRESORS PHOTOGRAPHIQUES D'ÉGYPTE

Gérard Réveillac

Actes Sud, 2017

192 pages, 36 euros

Une œuvre à définir, une vie dont on connaît peu de chose: le livre que

l'auteur consacre à l'artiste Beato

photographe d'origine vénitienne, se présente comme une enquête. Après environ deux années au Caire, Beato s'établit à Louxor où il passera le reste de ses jours, de 1862 à 1905. S'il fait partie des nombreux photographes fascinés par l'orientalisme, il s'en distingue par le choix qu'il fait de la Haute-Égypte, de Louxor à Abou Simbel et à la Nubie. Il occupe successivement deux maisons à Louxor, où il travaille beaucoup avec les archéologues, en particulier avec Georges Legrain, en charge du temple de Karnak. C'est ce même Legrain qui, à la mort du photographe, va organiser avec Maspero l'achat, par le tout jeune Musée du Caire, d'une collection de 309 clichés auprès de sa veuve.

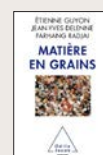
Les difficultés d'attribution sont

liées au fait que les photographies portent souvent une signature d'atelier, ne précisant pas le nom de celui qui a effectué le cliché, voire pas de signature du tout. Il faut donc recouper les sources à partir des activités connues de l'artiste et considérer le style, tâche plus malaisée. Ces clichés portent surtout sur l'architecture et la sculpture monumentales, domaine de prédilection de Beato, ce qui explique les commandes archéologiques qui lui ont été faites.

Mais on trouve aussi d'amples paysages du fleuve et des rives du Nil et un petit nombre de clichés ethnographiques. Le développement du tourisme et des «cartes correspondances» conduit aussi à un type d'images différent. Chemin faisant, le lecteur pénètre dans un monde où la prise de vues nécessitait une lourde infrastructure afin de transporter un matériel pesant et fragile dans un milieu hostile, avec chaleur intense et poussière, bien loin de l'appareil numérique contemporain.

JADINE GUILHOU / UNIVERSITÉ

PAUL VALÉRY MONTPELLIER 2

**MATIERE EN GRAINS**

J.-Y. Delenne et F. Radia

Odile Jacob, 2017

22 pages, 24,90 euros

Mesurer les grains, passer du grain à l'amas, étudier les contacts entre grains, les empilements qui en résultent, la percolation d'un liquide à travers cet empilement, puis le libérer pour qu'il s'écoule, mettre les grains en suspension pour obtenir un colloïde... Pour étudier la matière granulaire, un grain de folie est nécessaire tant elle est multiforme; rien en savoir rend fou, tant elle est universelle. Que vous soyez physicien ou pas, ce livre qui fait le tour du grain vous ravira, à condition d'avoir un grain de curiosité.

LES JARDINS DE LA PHYSIQUE

J. Allemand et V. Moncorge

CNRS Editions, 2017

60 pages, 20 euros

Les jardins de la physique, ce sont les écoles d'été de physique

de Gargèse, en Corse, et des Houches, à Chamonix, destinées à des jeunes chercheurs. Si vous avez participé à de tels séminaires, vous aimerez d'emblée cette évocation en textes et en images du bonheur que procure le partage entre physiciens. Dans ces écoles, la concentration des participants et les efforts qu'ils déploient pour bien comprendre créent une ambiance poétique et beaucoup d'occasions de collaborer. Ce livre élégant et joliment illustré les évoque parfaitement bien.

DE GAGARINE À THOMAS PESQUET L'ENTENTE EST DANS L'ESPACE

B. Bottlaender et P.-F. Mourieux

L'Espresso, 2017

76 pages, 17 euros

L'exploration spatiale a débuté dans la compétition de la guerre froide

mais elle s'est poursuivie avec toujours plus de collaboration. Les auteurs retracent plus de 40 ans de coopération entre nations spatiales depuis les programmes Apollo et Soyouz, les premiers vols d'astronautes français vers la station Mir, le programme commun Navette-Mir, puis, enfin, la station vraiment internationale... Ils suggèrent ainsi que la suite de l'exploration spatiale pourrait jouer un grand rôle à l'avenir dans l'entente entre nations.

LA ROCHELLE

JUSQU'AU 7 JANVIER 2018

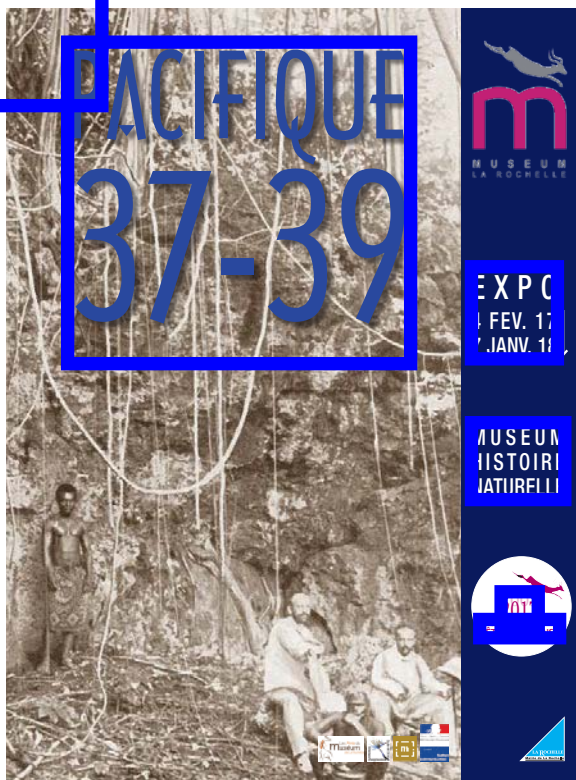
Muséum d'histoire naturelle de La Rochelle
www.museum-larochelle.fr

Pacifique 37-39

Entre documentaire et fiction.

Cette exposition s'appuie sur l'histoire rocambolesque

aux Nouvelles-Hébrides, l'actuel Vanuatu, à la fin des années 1930. Initialement composée d'ingénieurs, l'expédition avait pour objectif la recherche de ressources minières. Après la découverte fortuite d'une peuplade inconnue, une équipe d'ethnologues fut envoyée en secret pour l'étudier. Mais la Seconde Guerre mondiale interrompit la mission. Soixante-dix ans plus tard, les petits-enfants de l'un des ethnologues, mort au conflit, découvrent une malle pleine d'objets et de récits parcelaires liés à l'expédition et appartenant à leur grand-père. Ce sont ces documents qui font l'objet de l'exposition, dont la visite s'achève par le visionnage d'un film où se dévoilent les mystères de cette aventure scientifique, muséographique... et politique. ■



ET AUSSI

Le 9 septembre à 22 h 30 sur la chaîne Arte
www.arte.tv

LES SUPERPOUVOIRS DE L'URINE

Liquide tabou et méprisé, l'urine a pourtant bien des vertus : matière première, engrais industriel, outil de diagnostic, source d'énergie... C'est ce que s'efforce de montrer ce documentaire réalisé en 2013, pas du tout scatologique et dans la lignée de *La fabuleuse histoire des excréments*, diffusé par la chaîne en 2008.

Le 23 septembre à 22 h 30 sur la chaîne Arte
www.arte.tv

LES ÉTONNANTES VERTUS DE LA MÉDITATION

La méditation est un exercice cérébral bénéfique pour la santé physique et mentale de ceux qui la pratiquent, et la science commence à expliquer pourquoi. Et cela sans que ce soit nécessaire d'invoquer la « spiritualité ». Un sujet que l'on peut aussi retrouver dans le numéro de février 2015 de *Pour la Science*.

Mardi 26 septembre à 17 h Académie des sciences, Paris
www.academie-sciences.fr
6 À 7 AVEC CATHERINE BRÉCHIGNAC

Un mardi par mois, un membre de l'Académie des sciences rencontre pendant deux heures le public (sur inscription en ligne préalable) pour lui présenter ses recherches et répondre aux questions. Il s'agit cette fois de nanosciences.

Vendredi 29 septembre
<https://nuitdeschercheurs.france.eu>

NUIT EUROPÉENNE DES CHERCHEURS
Comme chaque année fin septembre, dans 12 villes de France et plusieurs centaines en Europe et ailleurs, une soirée est consacrée à la rencontre entre chercheurs et grand public. De nuit, les tours d'ivoire se voient moins !

LEWARDE (NORD, HAUTS-DE-FRANCE)

JUSQU'AU 31 DÉCEMBRE 2017

Centre historique minier
www.chm-lewarde.com

Coup de foudre



C'est la « merveilleuse histoire de l'électricité » qui est contée ici, de l'Antiquité jusqu'à nos jours, en passant bien sûr par les XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles, une période cruciale de cette épopée. Aux objets et documents exposés s'ajoutent des dispositifs que le visiteur peut manipuler, par exemple pour créer un arc électrique. ■

LIÈGE (BELGIQUE)

JUSQU'AU 31 AOÛT 2018

Institut de zoologie
www.embarcaderedusavoir.ulg.ac.be

Du poil de mammouth à l'œil du cyclope



Un foetus cyclope, un agneau à huit pattes, une naine géante, une plume fossile, une dent de mammouth, des pots de pharmacie, des thèses de médecine en latin... : cette exposition organisée dans le cadre du bicentenaire de l'université de Liège rassemble 200 bizarreries scientifiques issues des collections de cette université. ■

LA CIOTAT (BOUCHES-DU-RHÔNE)

DU 14 AU 17 SEPTEMBRE 2017
Cinéma Eden-Théâtre
www.lumexplore.com

Festival Lumexplore



Le «Festival du film d'exploration scientifique et environnementale», dénommé Lumexplore, en est à sa deuxième édition et se tient là où, en 1889, a été projeté le premier film de l'histoire, réalisé par les frères Lumière à La Ciotat. Organisé à l'initiative de la Société des explorateurs français, cet événement inclut la projection de nombreux films d'expéditions et de découvertes, dont près d'une quinzaine de longs-métrages (mission Rosetta, tombe de Gengis Khan, volcan Nyiragongo, corail, lac Baïkal...). La manifestation décerne aussi plusieurs prix, dont l'un récompense, dans le cadre d'une compétition junior, un film de 10 minutes réalisé par des élèves de collège ou de lycée de la région. À cela s'ajoutent les rencontres, des conférences et des expositions. ■

GENÈVE (SUISSE)

JUSQU'AU 7 JANVIER 2018
Muséum d'histoire naturelle de la ville de Genève
www.museum-geneve.ch



Fourmis

On connaît aujourd'hui plus de 12 000 espèces de fourmis, insectes qui constituent un monde fascinant par la complexité de leurs sociétés et la diversité de leurs comportements. C'est pourquoi, au Muséum de Genève, on leur a fait l'honneur, en proposant aux visiteurs un parcours où ils pourront notamment contempler des portraits géants de fourmis, comprendre leurs particularités, leur organisation et leur rôle dans les écosystèmes, observer une colonie de fourmis champignonnistes du genre *Atta*... Le clou de la visite est sans doute la plus grande collection historique de fourmis du monde (qui appartient au Muséum de Genève), celle rassemblée à la fin du XIX^e siècle par Auguste Forel, savant suisse qui a décrit plus de 1 500 espèces nouvelles pour la science de l'époque. ■

PARIS

DU 26 SEPTEMBRE AU 26 NOVEMBRE 2017
BnF François-Mitterrand
www.bnf.fr

Jean Rouch



Ethnologue célèbre

Le réalisateur de films, Jean Rouch aurait eu cent ans cette année.

Cette exposition lui rend hommage, en retraçant sa vie ainsi que son œuvre cinématographique et ethnographique à l'aide de photographies, de recueils écrits de traditions orales, de reportages pour la radio, de correspondances... ■

BORDEAUX

JUSQU'AU 21 MAI 2018
Cap Sciences
www.cap-sciences.net



Luminopolis

Les visiteurs de Luminopolis qui entrent dans le jeu de cette «cité» ne peuvent en ressortir qu'en faisant preuve d'un peu d'astuce et de curiosité pour résoudre, seuls ou à plusieurs, mais en temps limité, plus d'une dizaine d'énigmes. Ce jeu d'évasion permet d'acquérir des connaissances sur la lumière (quelle est sa nature, comment elle rythme notre quotidien, etc.) et de les tester de façon ludique. Mais gare à l'affluence, qui risque de retarder votre cheminement! ■

SORTIES DE TERRAIN

samedi 2 septembre
Hauterive, Fribourg (Suisse)
naturalistes-romands.ch
PAPILLONS NOCTURNES
Une soirée, de 20 h à minuit, à la découverte des papillons de nuit attirés par un petit piège lumineux.

samedi 9 septembre
Hyères (83)
<http://paca.lpo.fr/>
Tél. 04 94 01 09 77
LES OISEAUX DES SALINS D'HYÈRES
Une balade matinale de deux heures dans les salins qui ne sont plus exploités et qui abritent les milieux favorables aux sternes, échasses, gravelots, avocettes, flamands et autres oiseaux d'eau.

Dimanche 10 septembre
Mazet du Vaccarès, Camargue (13)
Tél. 04 90 97 00 97
LES GRANDES CABANES
Visite du site des Grandes Cabanes, dont font partie 50 hectares de l'étang de Vaccarès. Oiseaux, ortues, chauves-souris, flore des milieux saumâtres sont à découvrir dans ce site protégé habituellement fermé au public.

samedi 16 septembre
Fellingering (68)
www.geologie-alsace.fr
Tél. 06 47 29 16 20
LE THALHORN EN VALLÉE DE LA THUR
Balade facile de deux heures à la découverte géologique d'un site du parc naturel des Ballons des Vosges. À 800 mètres d'altitude, on foulera le fond d'un océan vieux de plus de 350 millions d'années...

Dimanche 17 septembre
Pouligney Saint-Pierre (36)
www.parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13
RÉSERVE DU BOIS DES ROCHES
Une promenade de trois heures pour s'imprégner d'un paysage de plateaux calcaires, observer la flore et ses insectes typiques, et écouter les contes et légendes liés à ce lieu.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

ÉCRANS... DE FUMÉE

« Être souvent » sur son écran ou sur son téléphone serait nocif. Quelle que soit l'activité pratiquée ?



A la maison, est tout le temps sur son ordinateur ! » Mais pour faire quoi précisément ? Là est la question.

Lorsque nous enseignons les rudiments de l'informatique à des débutants, nous leur demandons parfois, au cours d'un contrôle de connaissances, ce que sont Firefox, Thunderbird, etc. Une réponse correcte, mais qui ne nous aide pas à comprendre les logiciels qui permettent de lire une page web, écrire un courrier, etc. Mais une réponse hélas fréquente est que ce sont des icônes, sur lesquelles il est possible de cliquer.

Certes, il est vrai que cliquer sur une icône permet parfois de lancer ces logiciels, mais cette propriété est accidentelle : Firefox serait Firefox même s'il n'était pas possible de le lancer en cliquant sur une icône ; en revanche, Firefox ne serait pas Firefox s'il ne permettait pas de lire une page web.

Cette erreur est, en fait, le symptôme d'une autre, plus profonde : une trop grande focalisation des débutants sur les apparences, au détriment des choses en elles-mêmes. C'est parce que les icônes se manifestent à leurs yeux qu'ils se focalisent sur elles. Or en informatique, l'essentiel est invisible pour les yeux.

Transposé dans d'autres domaines de la connaissance, ce phénoménisme

mènerait à classer le Soleil et les incendies de forêt dans la catégorie des objets très lumineux, tandis que les étoiles et les flammes des allumettes seraient groupées dans la catégorie des objets peu lumineux. La physique permet de dépasser ces apparences et de classer le Soleil avec les autres étoiles, et les incendies de forêt avec les flammes des allumettes.

Une focalisation sur les apparences qui a parfois une dimension comique

Cette focalisation sur les apparences a parfois une dimension comique, comme dans cette phrase, rapportée par un enseignant britannique après une rencontre avec les parents d'un élève : « Johnny n'aura aucun problème en informatique au A-level [le baccalauréat britannique] : à la maison, il est toujours sur son ordinateur ! » « Être sur son ordinateur » n'est bien entendu pas une activité en soi, car les ordinateurs sont

des machines universelles, qui permettent des activités très diverses : jouer, faire des recherches pour un exposé, écrire un programme, etc. Mais que l'activité de Johnny soit de jouer en ligne ou d'écrire un programme importe peu à ses parents, car la seule chose que leurs yeux voient est qu'il est sur son ordinateur.

Cette focalisation sur les apparences a une dimension moins drôle dans les envahissants discours sur la nocivité des « écrans ». Ceux-ci provoquent, selon les auteurs, un déficit de l'attention et de la concentration, une assuétude aussi forte que l'alcool et le tabac, un retard du développement, des troubles du spectre autistique, etc.

Dans ces discours, qu'importe que ces écrans soient des écrans de télévision ou d'ordinateur, qu'ils soient utilisés pour regarder des œuvres de fiction ou des documentaires, pour discuter avec des amis ou écrire des programmes, pour jouer ou consulter une encyclopédie, etc. Car la nocivité qu'il s'agit de combattre n'est pas celle de ces activités (regarder une œuvre de fiction, activité naguère combattue par l'Église, qui excommunait les comédiens, ou discuter avec des amis, ce que condamnaient les mystiques ayant fait vœu de silence) : cette nocivité est celle des « écrans ». Or, mise à part leur forme rectangulaire, qu'ont en commun ces écrans ? D'être ce que nos yeux voient en premier quand nous observons : quelqu'un jouer, discuter avec des amis, écrire un programme, etc.

A l'heure où on reparle d'interdire les téléphones dans l'enceinte des écoles et des collèges, comme si « être sur son téléphone » était, en soi, une activité, nous pourrions tenter de dépasser les apparences et, au lieu de nous demander si nous devons autoriser ou interdire les téléphones à l'école, nous interroger sur ces activités, rendues possibles par ces appareils, que nous souhaitons y encourager ou décourager. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France. Son dernier livre, écrit avec Serge Abiteboul : *Le Temps des algorithmes* (Le Pommier, 2017).



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

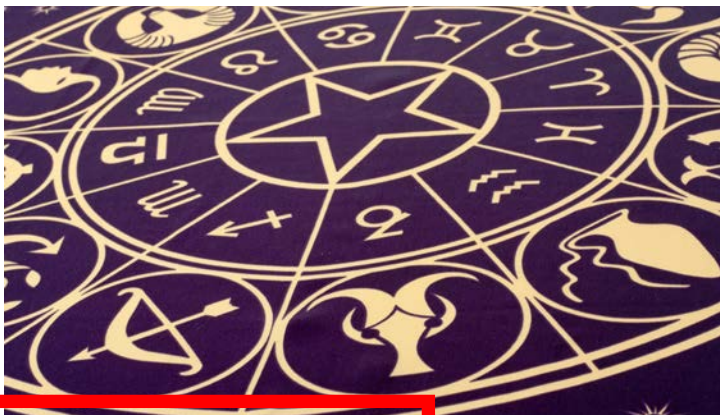
SCIENCE POUR LA



LA CHRONIQUE DE
GERALD BRONNER

ASTROLOGIE AUTORÉALISATRICE

Il faut se méfier des récits qui, à l'instar de ceux de l'astrologie, assignent un destin à l'individu. Y croire peut conduire à la réalisation de ce destin



Un horoscope peut influencer sur le cours de la vie de l'individu qui y accorde foi.

L'idée que nous nous faisons de nous-mêmes ou que les autres se font de nous n'est pas sans impact sur ce que nous devenons. De nombreux récits, dont on peut dire pour cette raison qu'ils sont déterministes, nous ont convaincus que l'astrologie lorsqu'elle prétend décrire les traits de notre personnalité en fonction de la configuration stellaire au moment de notre naissance.

Il se trouve que l'on peut parfaitement tester ces prédictions astropsychologiques, et c'est ce qu'ont fait en 1978, par une collaboration inaccoutumée, un psychologue de renom et un astrologue. Le premier, Hans Eysenk (le psychologue le plus fréquemment cité dans les revues scientifiques à la fin des années 1990) a notamment mis au point une série de tests qui permettent d'établir des typologies psychologiques impliquant la tendance à l'extraversion ou au névrotisme, par exemple. Le second, Jeff Mayo, était un astrologue fameux en Grande-Bretagne. Fondateur d'une école qui rencontrait un certain succès, il accepta de

faire passer à 2000 de ses clients et étudiants des tests psychologiques inspirés des travaux d'Eysenk.

Le but de cette étude était d'établir si l'on pouvait ou non retenir l'hypothèse de la détermination astrologique de la personnalité. Les résultats déconcertèrent les esprits rationalistes et réjouirent beaucoup les astrologues. En effet, certains signes décrits par la tradition astrologique comme plus extravertis

L'adhésion des sujets de l'étude aux thèses astrologiques était une donnée cruciale

que d'autres, par exemple, étaient bel et bien liés statistiquement aux indices correspondants du test. Globalement, les traits psychologiques typiques que l'astrologie associait aux signes horoscopiques paraissaient être respectés. Les

défenseurs de la magie des astres firent connaître ces résultats partout où ils le purent en prétendant, un peu vite, avoir fourni la preuve de l'existence d'un déterminisme astrologique.

En réalité, leur enthousiasme les avait aveuglés sur le fait pourtant évident que ces individus qui avaient passé le test connaissaient bien les théories astrologiques auxquelles, de surcroît, ils croyaient fermement. Or il s'agissait là d'une donnée cruciale. Pour le démontrer, Eysenk, désireux de savoir si les corrélations chères aux astrologues apparaîtraient également si les mêmes tests étaient proposés à des populations ignorant tout de la causalité astrologique ou n'y adhérant pas, a mené ultérieurement deux autres enquêtes d'envergure.

La première portait sur une population test de 1000 enfants qui ne connaissaient rien de l'astrologie. Les résultats furent bien différents : on ne nota aucune corrélation entre les signes du zodiaque et les caractéristiques psychosociales des sujets. La seconde est plus intéressante encore, puisque, réalisée avec des adultes cette fois, elle séparait nettement ceux qui connaissaient bien les récits astrologiques et ceux qui avouaient n'avoir aucune compétence en la matière : n'en déplaise aux astrologues, ces derniers adultes présentaient des niveaux d'extraversion ou de névrotisme tout à fait indépendants de leurs signes zodiacaux.

L'approche statistique a donc disqualifié les prétentions descriptives de l'astrologie en matière de psychologie humaine, mais les résultats de cette étude ont une portée plus générale. Méfions-nous des récits déterministes que nous assignons aux individus, qu'ils invoquent les astres, le prénom ou même encore l'origine sociale. Pour infondés que soient les uns et fondés que soient les autres, ils peuvent produire à l'unisson des croyances que le sociologue américain Robert Merton qualifiait d'autoréalisatrices et qui ne sont pas toujours profitables aux individus qui les endossent. ■

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

Les univers multiples

Miroir du monde quantique?

Notre univers serait loin d'être unique. Tout au contraire, il existerait, d'après les théories les plus récentes de l'inflation cosmologique, une infinité d'univers formant le « multivers ». D'un autre côté, la physique quantique présente elle aussi une multiplicité de mondes... tout du moins dans l'interprétation proposée par Hugh Everett en 1957. Peut-on relier les deux théories ? Oui, avance le physicien Yasunori Nomura : malgré leurs différences apparentes, le multivers et les mondes multiples d'Everett seraient équivalents.

ESSENTIEL

La théorie de l'inflation cosmique décrit la phase brutale d'expansion subie par l'Univers à ses tout débuts. Dans ce cadre, notre monde pourrait n'être qu'un élément d'un univers multiple, le multivers.

L'idée de multivers est problématique car elle fait perdre à la théorie tout potentiel prédictif.

L'auteur résout cette difficulté en faisant le lien entre le multivers et l'interprétation des mondes multiples en physique quantique.

Selon cette conception, notre univers ne serait qu'un parmi de nombreux autres qui coexistent dans l'espace des probabilités plutôt que dans un unique espace réel.

L'AUTEUR



MASUNORI NOMURA
directeur du Centre
de physique théorique
de l'université de
Californie à Berkeley

Le multivers quantique

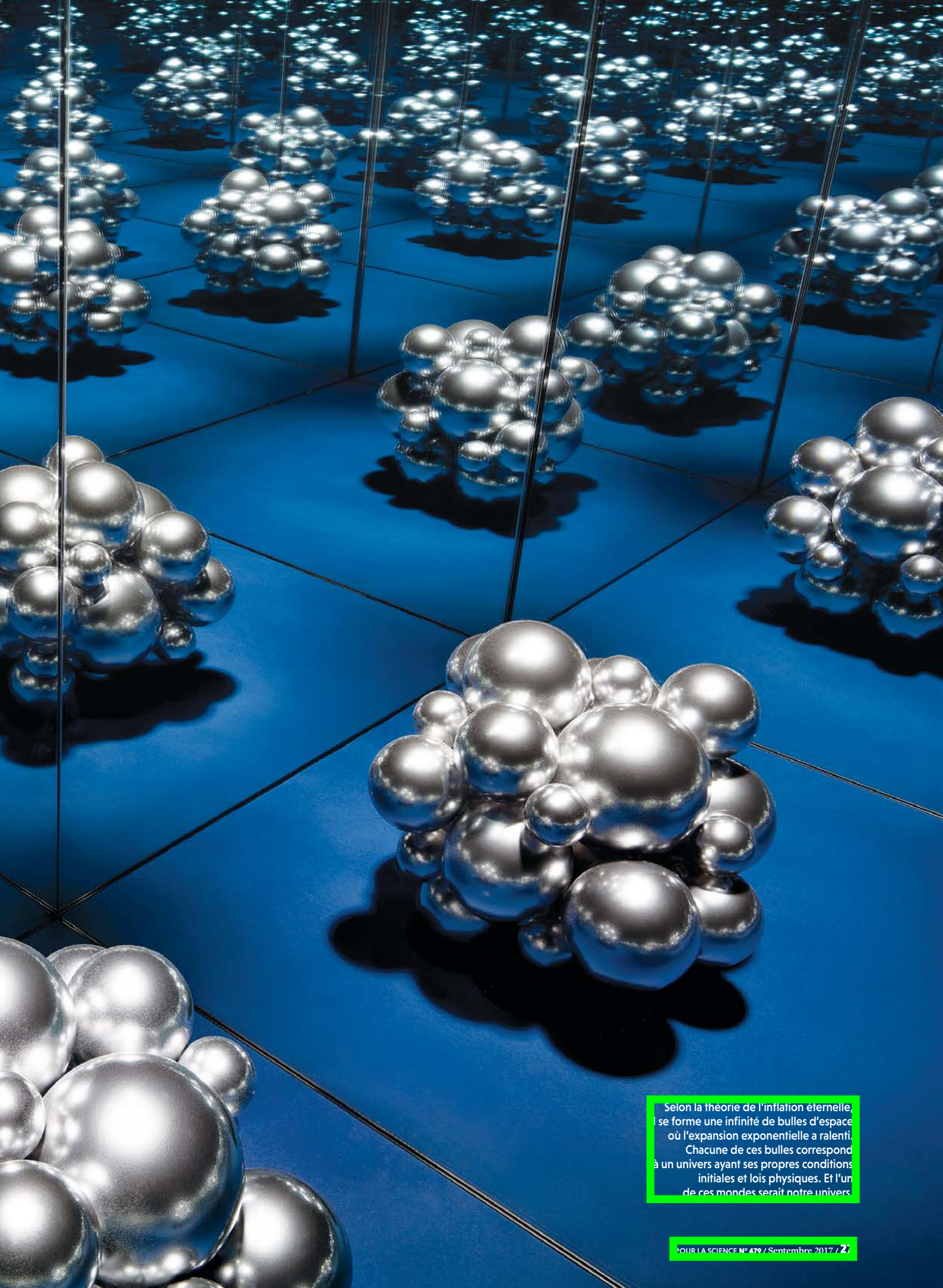
LA COSMOLOGIE LAISSE PENSER QUE NOTRE UNIVERS N'EN SERAIT QU'UN PARMIS D'INNOMBRABLES AUTRES. ET SI CETTE MULTIPLICITÉ D'UNIVERS COÏNCIDAIT AVEC L'IDÉE DES MONDES MULTIPLES AVANCÉE IL Y A SOIXANTE ANS POUR COMPRENDRE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

Pour de nombreux cosmologistes, ce que nous pensons être l'Univers dans son intégralité ne serait qu'une infime partie d'un ensemble bien plus vaste : le multivers. Selon ce scénario, il existerait une multitude d'univers, dont l'un serait celui où nous vivons. Et chacun de ces mondes serait régi par des lois différentes ; ce que nous pensions être les principes fondamentaux de la nature ne serait plus si absolu. Ainsi, les types et propriétés des particules élémentaires et de leurs interactions pourraient varier d'un univers à l'autre.

L'idée du multivers émerge d'une théorie suggérant que le cosmos primordial a subi une expansion fulgurante, exponentielle. Au cours de cette période d'« inflation cosmique », certaines régions de l'espace auraient vu leur expansion rapide prendre fin plus tôt que d'autres, formant ce qu'on appelle des « univers-bulles », un peu comme des bulles dans un volume d'eau bouillante. Notre univers correspondrait à l'une de ces bulles, au-delà de laquelle il y en aurait une infinité d'autres.

L'idée que notre univers ne représente qu'une petite partie d'une structure beaucoup plus vaste n'est pas aussi bizarre qu'il y paraît. Après tout, à travers l'histoire, les scientifiques ont appris à maintes reprises que le monde ne se résume pas à ce qui en est visible. Cependant, la notion de multivers, avec son nombre illimité d'univers-bulles, présente un problème théorique majeur : elle semble supprimer la capacité de la théorie de l'inflation à faire des prédictions sur les propriétés de notre univers, une exigence centrale pour qu'une théorie soit utile. Pour reprendre les mots d'un des pères de la théorie de l'inflation, Alan Guth, du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts),





Selon la théorie de l'inflation éternelle, se forme une infinité de bulles d'espace où l'expansion exponentielle a ralenti. Chacune de ces bulles correspond à un univers ayant ses propres conditions initiales et lois physiques. Et l'un de ces mondes serait notre univers.

> « dans un univers éternellement en inflation, tout ce qui peut arriver arrive; en fait, tout arrive un nombre infini de fois »

Dans un univers unique où les événements se produisent un nombre limité de fois, les chercheurs peuvent calculer la probabilité relative qu'un événement se produise plutôt qu'un autre en comparant les nombres de fois que ces événements se produisent. Mais dans un multivers où tout se produit un nombre infini de fois, un tel décompte est impossible et, dès lors, rien n'a plus de chances de se produire que le reste. On peut faire les prédictions que l'on veut, elles sont amenées à se réaliser dans l'un ou l'autre univers, mais cela ne nous renseigne en rien sur ce qui va se passer dans notre propre univers.

Cette absence d'efficacité prédictive dérange depuis longtemps les physiciens. Certains chercheurs, dont je fais partie, suggèrent que la théorie quantique (qui décrit le comportement des particules aux plus petites échelles) pourrait, ironiquement, indiquer la voie de la solution. Plus précisément, le scénario cosmologique d'un univers en éternelle inflation serait mathématiquement équivalent à l'interprétation des « mondes multiples » de la physique quantique. Cette idée est très spéculative, mais, comme nous le verrons, une telle connexion entre les deux théories donne des

Dans le multivers, tout ce qui peut se réaliser se réalise un nombre infini de fois

physiciens pour résoudre le problème des prédictions, mais pourrait aussi révéler des informations surprenantes sur l'espace et le temps.

L'idée d'une correspondance entre les deux théories m'est venue alors que je travaillais sur les principes de l'interprétation des mondes multiples de la physique quantique. Cette interprétation a vu le jour pour expliquer certains des aspects les plus étranges et contre-intuitifs de la physique quantique: cause et effet ne s'articulent pas comme dans le monde macroscopique qui nous est familier, et le résultat de tout processus y est toujours probabiliste. Pour l'illustrer, prenons l'exemple d'un ballon qu'on lance.

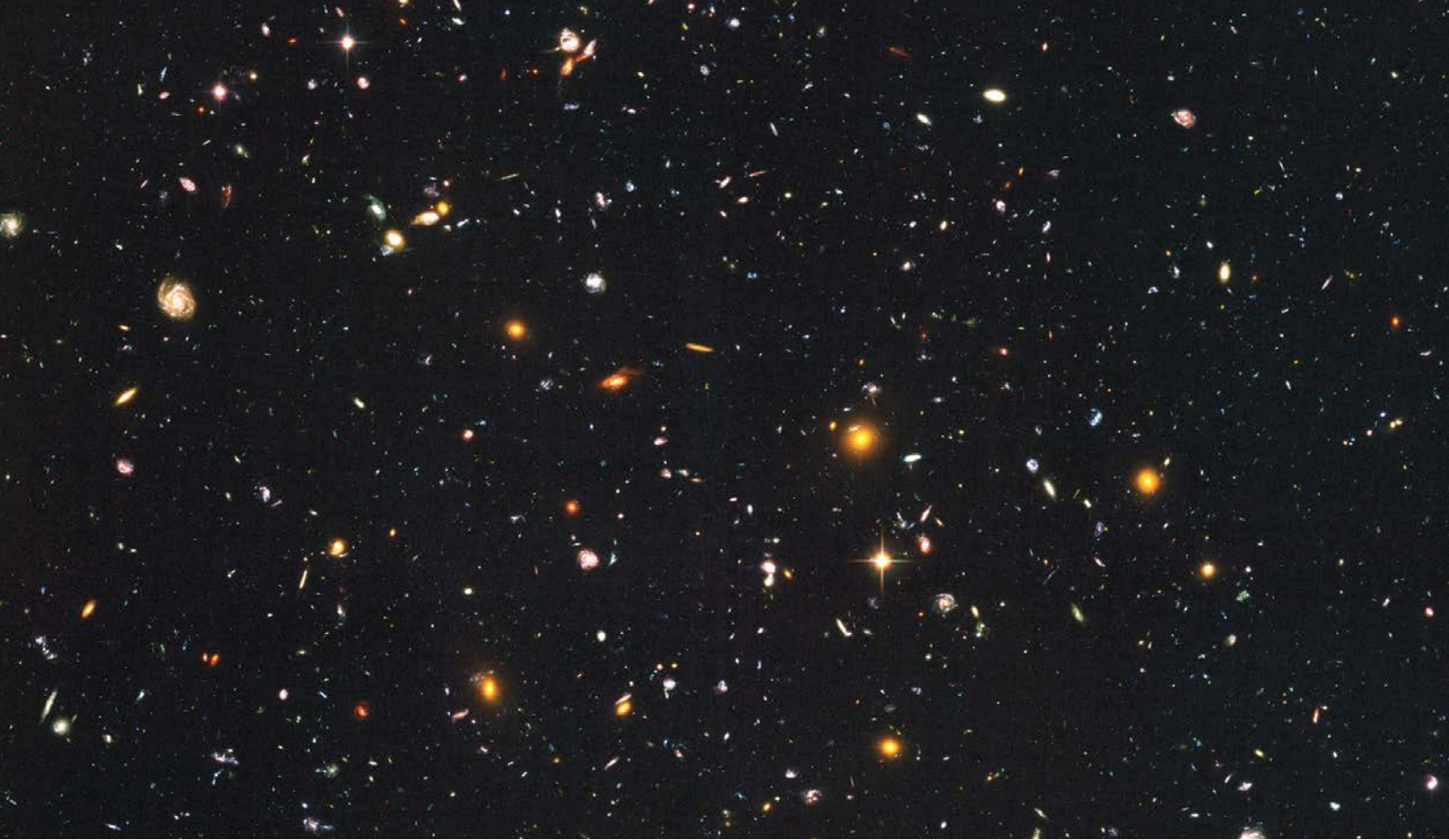
Dans notre vécu macroscopique, nous pouvons prédire où le ballon va atterrir en prenant en compte le point d'où il a été lancé, sa vitesse et d'autres paramètres. Si ce ballon était une particule quantique, tout ce que nous pourrions dire est qu'il a une certaine probabilité d'atterrir à tel endroit ou à un autre. Ce caractère probabiliste ne peut pas être éliminé par une meilleure connaissance des courants d'air ou autres facteurs liés au ballon; c'est une propriété intrinsèque de la nature. Le même ballon quantique lancé plusieurs fois exactement dans les mêmes conditions atterrira parfois au point A et parfois au point B. Cette conclusion paraît étrange, mais d'innombrables expériences ont confirmé les lois de la physique quantique, indispensables pour décrire le comportement des particules et des forces subatomiques.

LE CASSE-TÊTE DE LA MESURE QUANTIQUE

Dans le monde quantique, nous disons qu'une fois le ballon lancé, mais avant de chercher à voir son point de contact avec le sol, il est dans un état de superposition des résultats A et B, c'est-à-dire qu'il n'est ni dans l'état A ni dans l'état B, mais dans un brouillard probabiliste de A et de B à la fois. Mais une fois que nous regardons ce que devient le ballon, nous le trouvons en un point (disons A), et toute autre personne qui examine le ballon confirmera elle aussi qu'il se trouve bien en A. En d'autres termes, avant qu'un système quantique ne soit mesuré, son résultat est incertain, mais dès qu'il est mesuré, toutes les mesures ultérieures trouveront le même résultat que la première.

Dans l'interprétation habituelle, dite de Copenhague, de la physique quantique, on explique ce basculement en disant que la première mesure a fait passer le système de l'état de superposition à l'état A. Mais tout en prédisant correctement le résultat des expériences de laboratoire, l'interprétation de Copenhague mène à de sérieuses difficultés conceptuelles. Que signifie réellement la « mesure », et pourquoi fait-elle passer le système d'un état de superposition de possibilités à un état de certitude unique? Ce changement d'état se produit-il quand un chien ou une mouche observe le système? Et que se passe-t-il quand une molécule de l'air interagit avec le système, ce qui doit se produire tout le temps mais que nous ne traitons généralement pas comme une mesure susceptible d'interférer avec le résultat? Est-ce que le fait qu'un être humain apprenne consciemment l'état du système revêt une importance particulière?

En 1957, Hugh Everett, alors étudiant en thèse à l'université de Princeton, a proposé une nouvelle interprétation de la physique quantique, dite des mondes multiples. Elle traite de façon très élégante le problème, même si, à l'époque, beaucoup la tournaient en ridicule, et



L'idée a toujours à l'heure actuelle nettement moins d'adeptes que l'interprétation de Copenhague. L'intuition clé d'Everett est que l'état d'un système quantique reflète l'état de l'intégralité de l'univers qui l'entoure, de telle sorte que nous devons inclure l'observateur dans une description complète de la mesure. En d'autres termes, nous ne pouvons pas considérer le ballon, la main qui le lance et le vent séparément du reste, nous devons aussi inclure dans la description fondamentale la personne qui vient inspecter le point d'impact avec le sol, ainsi que tout le reste du cosmos à cet instant.

UN UNIVERS QUI SE DEDOUBLE

Dans ce contexte, l'état quantique après la mesure est encore une superposition, mais pas juste la superposition de deux points d'impact : celle de deux mondes entiers ! Dans le premier monde, l'observateur trouve que le ballon est au point A, et par conséquent tout observateur situé dans ce monde-là obtiendra le résultat A lors de chaque nouvelle mesure. Mais au moment de la mesure, l'univers s'est dédoublé et dans le second univers, l'observateur trouve, mesure après mesure, que le ballon est tombé au point B. Cette propriété explique pourquoi l'observateur a l'impression que sa première mesure a modifié l'état du système ; ce qui se passe en réalité, c'est que quand il fait une mesure, il se dédouble lui-même en deux personnes différentes qui vivent dans deux univers parallèles correspondant à deux résultats distincts.

Dans l'idée d'Everett, les humains qui font des mesures n'ont pas d'importance

particulière. L'état du monde entier se ramifie continuellement en de nombreux univers parallèles qui coexistent en superposition. Un observateur humain, faisant partie de la nature, ne peut échapper à ce cycle : il ne cesse de se diviser en de nombreux observateurs qui vivent dans des mondes parallèles et qui sont tous aussi « réels » les uns que les autres. Une implication évidente mais importante de ce scénario est que tout, dans la nature, obéit aux lois de la physique quantique, les petites choses comme les grandes.

Mais quel rapport y a-t-il entre cette interprétation de la physique quantique et le multivers issu de l'inflation éternelle, qui semble exister dans un espace réel continu et non comme des réalités parallèles ? En 2011, j'ai suggéré que le multivers et les mondes quantiques multiples à la Everett sont, d'une certaine façon, un seul et même concept. Dans cette approche, l'espace infiniment grand associé à l'inflation éternelle est une sorte d'illusion : les nombreux univers-bulles de l'inflation ne cohabitent pas physiquement dans un unique espace réel, mais représentent les différentes branches sur l'arbre des probabilités des mondes multiples d'Everett.

A peu près au moment où je faisais cette proposition, Raphael Bousso, de l'université de Californie à Berkeley, et Leonard Susskind, de l'université Stanford, ont avancé une idée assez similaire. Si elle est confirmée, l'interprétation des mondes multiples appliquée au multivers signifierait que les lois de la physique quantique jouent aussi un rôle crucial dans la détermination

Cette photographie du champ ultraprofond du télescope spatial Hubble montre des galaxies jusqu'à 13 milliards d'années-lumière de nous. Du fait de l'expansion de l'Univers, des objets beaucoup plus lointains s'éloigneraient de nous à des vitesses supérieures à celle de la lumière. Aucun photon ne parviendrait jusqu'à nous depuis ces objets, inaccessibles à jamais. Cet « horizon cosmologique » a des implications importantes pour la théorie des multivers.

Ce schéma est très simplifié pour des soucis de clarté. Dans la théorie du multivers, des bulles peuvent aussi naître dans des plus petites.

QUAND LA PHYSIQUE QUANTIQUE REJOINT LE MULTIVERS
 Si le multivers inflationnaire et l'interprétation des mondes multiples de la mécanique quantique correspondent à la même chose, la formation de nouveaux univers-bulles au cours du temps (voir ci-dessous) est simplement un exemple de ramification quantique : une nouvelle bulle qui se forme équivaut à l'obtention d'un résultat de mesure. Cette représentation résout le problème d'efficacité prédictive parce que les nombreux univers-bulles coexistent dans ce cas de manière probabiliste. Dans cette conception, l'observateur d'un univers en inflation peut faire des prédictions (attribut indispensable pour toute théorie scientifique utile) sur la base de la probabilité de survenue de tout événement.

Superposition des états
 plusieurs univers-bulles
 existent en même temps

Univers 1

Univers 1

Univers 1

Différents résultats de mesure dans l'univers 1

Temps cosmique

RÉSULTAT

► le la structure globale du multivers, même aux plus grandes échelles de distance.

Afin de mieux expliquer comment l'interprétation des mondes multiples de la physique quantique pourrait décrire le multivers inflationnaire, je dois faire une digression et parler des trous noirs. Ces astres très compacts déforment l'espace-temps environnant de façon extrême, au point que tout objet qui y tombe ne peut s'en échapper. La frontière qui définit le point de non-retour et qui sépare l'intérieur de l'extérieur du trou noir est nommée l'horizon des événements. Les trous noirs représentent un terrain de réflexion idéal pour la physique faisant intervenir des effets quantiques et gravitationnels forts. Une expérience de pensée sur ces entités nous montre où le concept traditionnel de multivers fait fausse route et rend impossibles les prédictions.

Imaginez que nous fassions tomber un livre dans un trou noir et que nous observions de l'extérieur ce qui se passe. Alors que le livre lui-même ne pourra jamais s'échapper du trou noir, la théorie quantique impose que l'information contenue dans celui-ci ne sera pas perdue. Or un trou noir s'évapore progressivement en émettant un faible rayonnement (un phénomène connu sous le nom de rayonnement de Hawking, découvert par le physicien Stephen Hawking). Il finit donc par disparaître. Que devient l'information? Elle se cacherait dans le rayonnement de Hawking. Ainsi, un observateur extérieur devrait, en principe, être capable de reconstituer toute l'information contenue dans le livre initial en examinant attentivement le rayonnement émis.

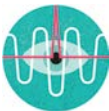
LE PARADOXE DU TROU NOIR

Il se passe quelque chose de curieux si nous imaginons la même situation du point de vue de quelqu'un qui tombe dans le trou noir en même temps que le livre. Dans ce cas, le livre semble simplement franchir la frontière du trou noir et rester à l'intérieur de ce dernier. Ainsi, pour l'observateur dans le trou noir, l'information du livre est contenue à jamais au sein du trou noir. D'un autre côté, nous venons d'expliquer que, du point de vue d'un observateur situé à l'extérieur, l'information finit par sortir de l'astre. Laquelle de ces propositions est la bonne? On pourrait penser que l'information est simplement dupliquée: une copie à l'intérieur, une copie à l'extérieur. Mais une telle solution est exclue. En physique quantique, un théorème très fort, d'impossibilité de clonage quantique, interdit d'avoir une copie à l'identique de l'information. Par conséquent, il semble que les deux situations vues par les observateurs respectifs ne peuvent être vraies toutes deux.

Les physiciens Gerard 't Hooft, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, Leonard Susskind et leurs collaborateurs ont proposé la solution

QUATRE INTERPRÉTATIONS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Le monde quantique est très étonnant et contre-intuitif. Les physiciens ont développé diverses façons de comprendre ce qui est sous-jacent au formalisme mathématique de la théorie quantique. Les univers multiples ne sont qu'une des interprétations possibles. Sur le plan expérimental, les diverses conceptions sont équivalentes : les résultats de mesure qu'elles prédisent sont les mêmes. Il est donc difficile de savoir quelle interprétation est la plus pertinente, et la question reste débattue.



L'interprétation dite de Copenhague a été développée entre 1925 et 1927, notamment par le Danois Niels Bohr et l'Allemand Werner Heisenberg. C'est la version « orthodoxe » de la théorie quantique. Selon cette interprétation, un système physique n'a pas de propriété bien définie avant une mesure. Ses propriétés mesurables sont données par un objet mathématique, la fonction d'onde. En appliquant la règle dite de Born à la fonction d'onde, on calcule les probabilités des résultats de la mesure. L'opération de mesure provoque la réduction de l'état quantique en un nouvel état, qui correspond au résultat effectif de l'expérience. Cette réduction instantanée de la fonction d'onde soulève de nombreuses difficultés conceptuelles. Par ailleurs, cette interprétation donne un rôle particulier à l'observateur.



Selon l'interprétation des univers multiples proposée par Hugh Everett en 1957, l'état quantique de l'Univers est unique, évolue régulièrement et de manière prévisible. Quand on effectue une mesure ayant deux résultats possibles (pour déterminer par laquelle de deux fentes un électron est passé, par exemple), cet état ne se réduit pas à l'état correspondant à une seule des deux issues ; l'Univers se dédoublerait en deux branches indépendantes, chacune correspondant à un des deux résultats. Ainsi, au cours du temps, l'Univers se ramifierait indéfiniment, comme un arbre où chacune des branches correspond à la réalisation d'un des résultats possibles. Mais cette théorie des « multivers » est incapable d'expliquer le processus responsable de la ramification et a du mal à justifier la règle de Born.



L'interprétation de l'onde-pilote a été proposée par Louis de Broglie dans les années 1920 et David Bohm dans les années 1950. Ils ont privilégié une réécriture du corpus mathématique de la physique quantique de façon à inclure un champ de force réel, nommé onde-pilote, qui contrôle le mouvement des particules. L'évolution au cours du temps de cette onde est décrite par l'équation de Schrödinger. Elle guide la particule et agit sur cette dernière de la façon d'un champ électrique. La particule a un état déterminé même sans mesure. Cependant, cette image séduisante échoue dès que plusieurs particules sont impliquées. Plus troublant encore, l'onde-pilote exerce une action à distance, par laquelle des effets physiques sont transmis instantanément à grande distance.



Les théories de la réduction spontanée ont été introduites dans les années 1970 par l'Allemand Dieter Zeh. Plutôt que d'éliminer la réduction de la fonction d'onde due à l'observateur, ces théories postulent qu'il s'agit d'un processus entièrement naturel : de tels processus ont lieu spontanément, bien que rarement, pour chaque système quantique, mais deviennent prépondérants quand le système quantique interagit avec un objet macroscopique. Ces théories doivent cependant expliquer comment est réalisée la réduction. Des expériences de laboratoire, portant sur des systèmes constitués de quelques atomes ou photons, ont été réalisées ou sont en cours afin d'analyser les mécanismes de l'œuvre et de les élucider.

suivante: les deux visions peuvent être valables, mais pas en même temps. Si vous êtes un observateur lointain, alors l'information est à l'extérieur. Vous n'avez pas besoin de décrire l'intérieur du trou noir, parce que vous ne pouvez jamais y accéder par principe; en fait, pour éviter le clonage de l'information, vous devez vous représenter l'espace-temps comme n'existant à l'intérieur. Par ailleurs, si vous êtes l'observateur qui tombe dans le trou noir, alors vous n'avez accès qu'à l'intérieur, et il contient le livre et son information.

Cette représentation n'est envisageable qu'en acceptant de ne pas tenir compte du rayonnement de Hawking émis par le trou noir; mais cette liberté vous est permise parce que vous avez vous-même traversé l'horizon des événements du trou noir et que vous êtes donc piégé dedans, coupé du rayonnement émis de l'horizon vers l'extérieur. Il n'y a pas d'incohérence entre ces deux points de vue; c'est uniquement si vous essayez de «recoller» artificiellement les deux, ce qui n'est jamais possible physiquement (car vous ne pouvez pas être à la fois l'observateur éloigné et celui qui tombe), que surgit l'incohérence apparente du clonage de l'information.

HORIZONS COSMOLOGIQUES

Quel est le lien entre la situation du trou noir et l'univers en expansion éternelle et les multivers? Il existe dans le cas de l'univers une frontière qui présente d'importantes similarités avec l'horizon des événements du trou noir: l'horizon cosmologique, la limite de l'univers observable (la région d'espace-temps dont nous pouvons recevoir des signaux). En effet, l'espace étant en expansion exponentielle, les régions situées au-delà de l'horizon cosmologique s'éloignent plus vite que la vitesse de la lumière. Conséquence: aucun message qui émane de ces régions ne pourra jamais parvenir jusqu'à nous. Cette situation est par conséquent apparentée à celle du trou noir vu par un observateur lointain.

Ainsi, si l'on applique au multivers le raisonnement suivi pour le trou noir, la physique quantique impose que, pour un observateur situé à l'intérieur de l'horizon cosmologique, l'espace-temps à l'extérieur de l'horizon cosmologique est simplement non existant. Si nous essayons de tenir compte de cet espace-temps au-delà de la limite, nous avons des problèmes d'information comptée en trop. Dès lors, toute description de l'état quantique de l'univers ne devrait inclure que la région en deçà de l'horizon – en particulier il ne peut pas y avoir d'espace infini dans une description cohérente et unique du cosmos.

Mais, dans ce cas, où sont les multivers et les univers-bulles s'ils ne sont pas dans un espace infini? La réponse réside dans la façon dont les univers-bulles sont créés. Un univers-bulle se

forme là où l'inflation s'arrête de façon aléatoire. Le processus est donc probabiliste, comme n'importe quel autre processus en physique quantique. De la même façon qu'une mesure quantique engendre divers résultats avec leurs probabilités de survenue, l'inflation produit de nombreux univers différents, avec chacun une certaine probabilité de voir le jour. En d'autres termes, l'état quantique représentant un espace en perpétuelle expansion est une superposition

Au-delà de l'horizon cosmologique, les régions s'éloignent plus vite que la vitesse de la lumière

de mondes correspondant à des univers différents. On commence à entrevoir le rapprochement avec l'interprétation des mondes multiples de la physique quantique.

Mais peut-on calculer des probabilités dans ce scénario? Rappelons qu'une des critiques principales vis-à-vis de l'inflation éternelle est que chaque événement se produit une infinité de fois et que cette description n'a aucune efficacité prédictive. Avec notre nouvelle façon d'interpréter le multivers, le problème de la prédictivité trouve une solution. Les univers-bulles ont une taille finie, limités par l'horizon cosmologique. Ils évitent l'écueil de l'espace infini qui contient l'infinité de toutes les réalisations possibles. En outre, ils n'existent pas tous simultanément dans l'espace réel, ils ne font que cohabiter dans «l'espace des probabilités», c'est-à-dire en tant que résultats possibles d'observations faites par des personnes vivant à l'intérieur d'un des mondes. Ainsi, chaque univers conserve une probabilité bénéfique d'advenir.

Cette représentation unifierait le multivers issu de l'inflation éternelle de la cosmologie et les mondes multiples d'Everett. L'histoire cosmique se déroule alors comme suit: le multivers démarre d'un certain état initial et évolue en une superposition de nombreux univers-bulles. À mesure que le temps passe, les états représentant chacune de ces bulles se ramifient en un nombre croissant de superpositions d'états représentant les divers résultats possibles d'observations effectuées au sein de ces univers. Finalement, l'état représentant le multivers

> entier comportera donc un nombre énorme de branches, correspondant chacune à un monde possible pouvant découler de l'état initial. Les probabilités quantiques déterminent donc des résultats en cosmologie aussi bien que dans les processus microscopiques. Le multivers et les mondes multiples quantiques sont en réalité une seule et même chose; ils correspondent simplement au même phénomène (la superposition d'états) qui se produit à des échelles complètement différentes.

Dans ce nouveau cadre, notre monde n'est qu'un seul parmi tous les mondes qu'autorisent les principes fondamentaux de la physique quantique et qui existent simultanément dans l'espace des probabilités.

Afin de savoir si cette idée est correcte, nous aimerions la tester expérimentalement. Mais est-ce réalisable? Peut-être en mesurant la courbure spatiale de notre univers. En 2005, Leonard Susskind et ses collègues ont montré que le multivers engendre une petite quantité de courbure négative dans notre univers. En d'autres termes, à grande échelle, la géométrie serait comparable en trois dimensions à la surface d'une selle de cheval. Il pourrait en effet exister une telle courbure parce que, même si les univers-bulles sont finis vus dans la perspective du multivers entier, les observateurs à l'intérieur d'une bulle, qui voient leur univers comme étant infiniment grand, le percevraient alors d'une courbure négative.

UN TEST: LA COURBURE DE L'UNIVERS

Les indications dont nous disposons à l'heure actuelle suggèrent un cosmos plat. Mais, dans les prochaines décennies, de futures observations du fond diffus cosmologique, le rayonnement émis par l'Univers vers 380 000 ans après l'âge, permettront de mesurer avec une précision accrue la courbure.

Si ces expériences détectent une courbure légèrement négative, elles étayeraient le concept de multivers parce que, bien qu'une telle courbure soit techniquement possible dans un univers unique, elle y est peu plausible. Et une éventuelle découverte de courbure négative renforcerait particulièrement l'idée de multivers quantique décrite ici, parce que ce scénario conduit naturellement à une courbure assez grande pour être détectée, alors que le tableau inflationnaire classique du multivers tend à produire une courbure négative inférieure de plusieurs ordres de grandeur à tout ce que nous pouvons espérer mesurer. Chose intéressante, la découverte d'une courbure positive réfuterait complètement la notion de multivers, parce que la théorie de l'inflation implique que les univers-bulles ne peuvent produire une telle courbure.

Par ailleurs, si nous avons de la chance, nous pourrions même voir dans le fond diffus

cosmologique des signes spectaculaires du multivers, sous la forme de vestiges d'une « collision » de notre univers-bulle avec un autre. Mais les chercheurs sont peu optimistes que nous détecterons un jour de tels signaux.

Avec d'autres physiciens, je travaille aussi à développer l'idée de multivers quantique au niveau théorique. Nous pouvons poser des questions fondamentales telles que

Dans ce cadre théorique, le temps apparaît comme un concept émergent

« Comment peut-on déterminer l'état quantique du multivers entier? » ou « Qu'est-ce que le temps, et comment émerge-t-il? ». Le tableau du multivers quantique ne répond pas immédiatement à ces questions, mais il fournit un cadre pour les traiter.

Récemment, par exemple, j'ai montré que certaines contraintes mathématiques sur les probabilités issues de notre théorie nous permettront peut-être de déterminer l'état quantique unique du multivers entier. Ces contraintes suggèrent aussi que l'état quantique global reste constant même si un observateur physique, qui fait partie de l'état du multivers, voit de nouvelles bulles se former sans cesse. Cela implique que notre conscience d'un univers qui change au fil du temps, et en fait la notion même de temps, pourrait être une illusion. Le temps, dans cette optique, est un concept émergent, quelque chose qui surgit d'une réalité plus fondamentale et qui semble n'exister que dans les branches locales du multivers.

Beaucoup des idées que je viens de présenter sont encore très spéculatives, mais il est passionnant que les physiciens soient en mesure de réfléchir à ces grandes et profondes questions sur la base des avancées théoriques actuelles. Où ces explorations nous mèneront-elles? Il semble clair en tout cas que nous vivons une ère exaltante dans laquelle nos explorations scientifiques vont au-delà de ce que nous pensions être le monde physique entier – notre univers – pour atteindre un domaine potentiellement sans limites au-delà. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Guth et Y. Nomura, **What can the observation of a nonzero curvature tell us?**, *Phys. Rev. D*, vol. 86, 023534. 2012.

R. Bousso et L. Susskind, **Multiverse interpretation of quantum mechanics**, *Phys. Rev. D*, vol. 85, 045007. 2012.

Y. Nomura, **Physical theories, eternal inflation, and the quantum universe**, *Journal of High Energy Physics*, vol. 2011, n° 11, article 063. 2011.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

NOUVELLE FORMULE



FORMULE PASSION
-28%



FORMULE DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE INTÉGRALE
-42%



8,20€



6,50€



4,90€

BULLETIN D'ABONNEMENT

Envoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 170 bis, boulevard du Montparnasse - 75014 Paris - 01 79 79 39 39 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE. JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
par mois
-42%
PVAE2017

☐ **FORMULE PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
par mois
-28%
PVAE2017

☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
par mois
-25%
PVAE2017

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____
Ville : _____
Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____
E-mail obligatoire : _____@_____
J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

PA54791

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte
Nom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____
Désignation du compte à débiter
IC (Identification internationale de la banque) : _____
BAN : _____
Numéro d'identification international du compte bancaire : _____
Établissement teneur du compte
Nom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme financier : Pour la Science

70 bis, boulevard du Montparnasse - 75014 Paris

IC : FR9777426900

Code de référence unique de mandat (RUM)

Je tiens à joindre impérativement un RIB

Je tiens à réserver mon abonnement à l'étranger

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives.
Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine.
Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr.
Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.

**SEBASTIEN
RENAUX-PETEL**

est chercheur du CNRS dans
le groupe Physique théorique :
gravitation et cosmologie
de l'IAP (Institut
l'astrophysique de Paris).
Il est spécialiste
de l'inflation cosmique.



L'inflation cosmologique reste le scénario le plus satisfaisant

INGREDIENT ESSENTIEL DE LA THÉORIE MODERNE
DU BIG BANG ET DES SPÉCULATIONS SUR LES UNIVERS
MULTIPLES, L'INFLATION COSMIQUE EST UNE IDÉE QUI AGITE
ENCORE BEAUCOUP LES THÉORICIENS. POURQUOI ?
LES EXPLICATIONS DE SÉBASTIEN RENAUX-PETEL.

Qu'est-ce que l'inflation cosmique ?

Jébastien Renaux-Petel : Il y a 13,7 milliards d'années, l'Univers aurait connu une phase d'expansion extrême, les distances dans le cosmos ayant été multipliées par environ 10^{30} en une fraction de seconde. L'idée de cette « inflation » a été introduite dans les années 1980 pour résoudre divers problèmes liés à la théorie du Big Bang.

De quels problèmes s'agissait-il ?

La théorie du Big Bang dans sa forme moderne a été développée durant l'après-guerre, notamment par George Gamow. En partant des observations d'Edwin Hubble montrant que l'Univers est en expansion, Gamow et ses collègues ont conclu que l'Univers était plus chaud et plus dense par le passé. Ils ont alors compris que lorsque l'Univers n'avait que quelques minutes, les protons et les neutrons se sont liés pour former les noyaux atomiques des éléments les plus légers (hydrogène, hélium...). Environ 380 000 ans plus tard, les électrons et les noyaux se sont assemblés pour former des atomes neutres, ce qui a permis à la lumière de se propager. Cette lumière originelle devait laisser sa trace sous la forme d'un rayonnement, le « fond diffus cosmologique ».

Les observations ont confirmé ces prédictions du modèle du Big Bang. Le fond diffus cosmologique a été observé pour la première fois par les Américains Arno Penzias et Robert Wilson en 1964. Ils ont montré qu'il est uniforme à travers tout le ciel et que son spectre correspond à celui d'un corps noir chauffé à 2,7 kelvins (Gamow et ses collègues avaient calculé une valeur de 5 kelvins).

Or cette homogénéité à grande échelle pose problème, car, compte tenu du taux d'expansion de l'Univers, on montre que des régions du fond diffus séparées de plus de deux degrés sur la voûte céleste n'ont jamais pu être en contact. Elles n'ont donc pas de raison d'être à la même température, à moins de supposer que l'état initial de l'Univers était extrêmement uniforme, ce qui n'est pas très naturel. D'où l'idée de l'inflation.

Comment l'inflation résout ce problème ?

Si l'on suppose que l'Univers a connu une gigantesque expansion avant les ères décrites par le modèle conventionnel du Big Bang, les régions du ciel qui ne sont pas causalement liées sans l'inflation le deviennent. L'inflation apporte aussi une réponse à une autre difficulté : le fait que la géométrie spatiale de l'Univers soit euclidienne à grande échelle. Une telle géométrie suppose un ajustement très fin des conditions initiales de l'Univers. Avec l'inflation, cette géométrie devient naturelle. On illustre souvent cette idée avec l'image d'un ballon de baudruche que l'on gonfle. Un petit élément de

la surface du ballon dégonflé est lisse et devient presque plat lorsque le ballon se remplit d'air.

L'idée de l'inflation conduit-elle aussi à des prédictions ?

Les premiers physiciens qui ont travaillé sur cette idée, dans les années 1980, ont montré que les fluctuations quantiques qui ont lieu pendant l'inflation seraient amplifiées. Elles formeraient des zones de surdensité, où vont naître les galaxies et les amas de galaxies. Plus important, ces fluctuations seraient aussi visibles dans le fond diffus cosmologique comme de petits écarts à la température moyenne de 2,7 kelvins, fluctuations que l'on n'avait pas encore observées.

Les chercheurs avaient aussi prédit certaines caractéristiques de ces fluctuations. Notamment, elles devaient être statistiquement corrélées et presque invariantes d'échelle (il y a presque autant de fluctuations aux petites échelles qu'aux grandes). Ces fluctuations ont été découvertes en 1992 par le satellite COBE, puis elles ont été mesurées avec une grande précision surtout par les satellites WMAP et Planck. Ces fluctuations sont de l'ordre de 10^{-5} par rapport à la température moyenne et présentent les propriétés prévues.

Quel serait le mécanisme de l'inflation ?

L'ingrédient fondamental du scénario inflationnaire est ce qu'on nomme un champ quantique scalaire. Un champ scalaire est un objet mathématique qui associe une valeur à chaque point de l'espace et à chaque instant. La carte des températures est un exemple de champ scalaire... non quantique !

Le seul champ quantique scalaire fondamental que l'on connaisse aujourd'hui est celui associé au boson de Higgs. Mais supposons l'existence d'un autre champ scalaire qui remplit l'Univers primordial. Comme il contient une certaine énergie, d'après les équations de la relativité générale, il participe à la dynamique de l'Univers. Cette énergie a deux formes. L'une, cinétique, est liée aux variations de la valeur du champ au cours du temps ; l'autre, potentielle, dépend de la valeur du champ suivant une certaine fonction que l'on nomme le potentiel. On montre que, pour qu'il y ait inflation, le potentiel doit être horizontal : l'énergie potentielle est alors constante et, le champ ne variant pas, l'énergie cinétique est nulle.

Si le potentiel est complètement plat, l'Univers reste en inflation. Comment en sortir ? Une solution est de supposer que le potentiel diminue d'abord légèrement quand la valeur du champ augmente (voir la figure page 38). La valeur du champ scalaire augmente alors lentement et l'énergie potentielle diminue. Lors de ce « roulement lent », l'énergie cinétique est encore négligeable, et cette phase correspond

une expansion cosmique accélérée. Et quand la pente du potentiel augmente, l'énergie cinétique n'est plus négligeable; on sort dans ce cas du régime d'inflation.

Que se passe-t-il à la fin de l'inflation ?

L'expansion de l'Univers se poursuit, mais de manière décélérée. Le champ scalaire, lui, finit par atteindre un minimum du potentiel et y osciller. Dit autrement, les inflatons, les particules associées à ce champ, se désintègrent en particules classiques (photons, électrons, quarks, etc.). Cette phase, dite de réchauffement, est importante, puisque c'est à ce stade que l'Univers se remplit de son contenu matériel (toute matière présente avant l'inflation a été diluée dans les mêmes proportions que l'Univers a grandi !). Le problème est que nous ne savons pas encore décrire rigoureusement la phase de réchauffement.

Comment la forme du potentiel du champ scalaire est-elle déterminée ?

Si l'on opte pour une approche effective, on peut construire «à la main» le potentiel que l'on veut. De plus, on n'est pas obligé de se limiter à un seul champ scalaire: on peut en avoir deux, trois, cent... Si l'on part de théories de gravité quantique comme la théorie des cordes, le potentiel est donné par les champs scalaires de la théorie. Ces théories contiennent toujours un grand nombre de champs scalaires, ce qui laisse penser que l'inflation due à un seul champ scalaire est peu naturelle. Il découle de ces approches une grande diversité de scénarios inflationnaires, et des prédictions observationnelles variées.

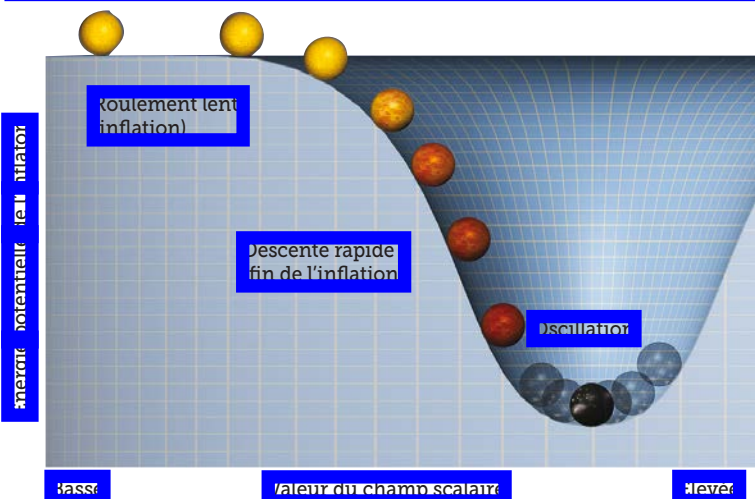
De quelles observations s'agit-il ?

Au-delà de l'étude précise de la déviation à l'invariance d'échelle, il existe deux contraintes observationnelles principales pour les scénarios d'inflation: les ondes gravitationnelles primordiales et les non-gaussianités. Les premières sont simples à comprendre, il s'agit de fluctuations de l'espace-temps, des ondes gravitationnelles, qui sont amplifiées pendant l'inflation. Leur détection serait une preuve que l'inflation a eu lieu. Malheureusement, elles n'ont rien à voir avec les ondes gravitationnelles détectées en 2015 et 2016 par la collaboration LIGO-Virgo, qui sont de nature astrophysique et produites par la coalescence de paires de trous noirs.

Les ondes gravitationnelles primordiales devraient avoir laissé une trace dans le fond diffus cosmologique: une polarisation de ce rayonnement selon une configuration particulière, nommée mode B. Plus le taux d'expansion de l'Univers pendant l'inflation est important, plus le mode B serait prononcé dans le fond diffus. Le satellite Planck n'a pas mis en évidence ce mode de polarisation. Les cosmologistes ont

LE MOTEUR DE L'INFLATION

Dans un scénario simple, un champ scalaire, nommé inflaton, a initialement une énergie potentielle élevée et «roule» lentement vers le minimum. Les équations montrent que l'Univers subit alors une phase d'inflation. Lorsque ce champ est mathématiquement analogue à celui d'une bille qui roule sur la pente douce d'un plateau et dévale ensuite la pente vers le fond d'une vallée.



long pu mettre une limite supérieure sur l'échelle d'énergie de l'inflation, ce qui a permis l'exclusion de nombreux scénarios. De futurs programmes d'observation du fond diffus devraient améliorer les contraintes sur le mode B.

Et les non-gaussianités ?

Dans la plupart des modèles inflationnaires, les caractéristiques statistiques des fluctuations quantiques amplifiées suivent une distribution quasi gaussienne (une distribution statistique en forme de cloche, très courante pour décrire les processus aléatoires). Les petits écarts à cette distribution sont les «non-gaussianités». Comme les fluctuations pendant l'inflation ont donné naissance aux fluctuations de température du fond diffus et aux grandes structures de l'Univers, on cherche à mesurer les non-gaussianités dans ces deux contextes. Pour l'instant, les données de Planck sont en parfait accord avec une distribution gaussienne.

Le télescope spatial Euclid, qui sera lancé en 2020, étudiera la distribution de matière dans l'Univers et les non-gaussianités. Cette analyse est difficile: la formation des grandes structures induit beaucoup d'effets dits non linéaires qui créent des non-gaussianités, et il sera donc délicat d'extraire celles d'origine primordiale. Un autre projet est d'enregistrer le rayonnement émis par la matière 150 millions d'années environ après l'émission du fond diffus cosmologique, pendant l'ère sombre, c'est-à-dire avant la formation des premières étoiles. Les effets non

BIBLIOGRAPHIE

A. Ijjas et al., **Pop goes the universe**, *Scientific American*, vol. 316, n° 2, février 2017.

S. Renaux-Petel et K. Turzynski, **Geometrical destabilization of inflation**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, 141301, 2016.

A. Bouquet, **L'inflation de l'Univers**, *Dossier Pour la Science*, n° 45, octobre-décembre 2004.

inéraires y sont moins importants. Mais ce rayonnement est très faible (il faudrait placer des antennes sur la face cachée de la Lune pour se protéger des émissions venant de la Terre!). Un tel projet ne verra le jour que d'ici 20 à 30 ans.

Pourquoi certains physiciens sont-ils pessimistes quant à la possibilité de tester l'inflation ?

Certains considèrent que l'inflation est une idée impossible à tester par les observations, ce qui est un critère essentiel pour une théorie scientifique. Ils ajoutent que la diversité des scénarios inflationnaires et leur flexibilité face aux contraintes empêchent le paradigme inflationnaire d'être réfutable.

Une polémique à ce sujet est récemment née d'un article paru dans *Scientific American* et cosigné par Paul Steinhardt. Ce chercheur de l'université de Princeton est l'un des pères de la théorie de l'inflation, mais il se montre aujourd'hui très critique. Il est sain que des scientifiques mettent le doigt sur des difficultés que les autres n'ont pas vues, cela fait partie du processus normal de la recherche. C'est en essayant de répondre à ce genre de critiques que l'on améliore une théorie ou, au contraire, que l'on se rend

Paul Steinhardt, c'est qu'à chaque « univers-bulle » correspondront des conditions initiales arbitraires, puisque les fluctuations ayant conduit à la formation de cet univers bulle sont aléatoires. Il est alors impossible de prédire les propriétés de notre propre univers.

C'est un cadre qui se prête à de nombreuses réflexions théoriques. Par exemple, Yasunori Nomura utilise cette idée d'inflation éternelle et de multivers pour dresser un parallèle avec l'interprétation de la mécanique quantique proposée par Hugh Everett en 1957 (voir l'article page 26 à 34). La plupart des cosmologistes pensent que la question de l'inflation éternelle est probablement importante sur le plan conceptuel, mais que ses conséquences pratiques sont imitées. C'est peut-être une erreur, mais au quotidien, on n'utilise pas cette notion d'inflation éternelle lorsqu'on cherche à résoudre les problèmes de l'inflation dans notre univers.

Le problème du réchauffement, par exemple :

Oui, mais pas seulement. J'ai récemment publié un article qui, je pense, sera important pour étudier des scénarios inflationnaires réalistes. Jusqu'à présent, nous nous sommes uniquement concentrés sur la forme du potentiel. Mais j'ai montré que nous avons omis une autre propriété importante. Dans une théorie à plusieurs champs scalaires, la dynamique de ces derniers est soumise à la géométrie de l'espace interne dans lequel vivent ces champs et ne dépend donc pas uniquement du potentiel. L'une des conséquences de ce nouveau facteur est que l'inflation peut s'interrompre de façon prématurée. Pour chaque modèle donné, les limites de compatibilité des données observationnelles sont alors modifiées. On le voit, il y a encore beaucoup de chemin à faire pour comprendre vraiment l'inflation.

Existe-t-il des alternatives à l'idée d'inflation ?

Il y en a quelques-unes. Je n'en suis pas spécialiste, mais le consensus scientifique est qu'elles présentent toutes des problèmes plus importants que l'inflation. L'univers avec rebond, par exemple, décrit un univers qui se contracte puis repart en expansion. L'idée est séduisante dans la mesure où elle évite la singularité initiale du Big Bang. Selon Paul Steinhardt, ce modèle ne présente pas certains problèmes de conditions initiales de l'inflation. Mais aucune théorie physique ne permet à l'heure actuelle de réaliser de manière satisfaisante un tel rebond.

L'inflation cosmique reste aujourd'hui le scénario le plus satisfaisant sur les plans théorique et observationnel. Mais les physiciens adorent les surprises et guettent la nouvelle idée qui fera progresser notre compréhension du monde – même si elle doit détrôner l'inflation! ■

Propos recueillis par Sean Bailly

Il y a encore beaucoup de chemin à faire pour comprendre vraiment l'inflation

Compte qu'elle n'est pas satisfaisante. L'article virulent de Paul Steinhardt a été mal accueilli par la communauté et une trentaine de scientifiques lui ont répondu dans une lettre ouverte. Les critiques de Paul Steinhardt sont multiples; il évoque notamment la non-testabilité de l'inflation et le problème de l'inflation éternelle.

De quoi s'agit-il ?

L'inflation éternelle est l'idée que si un champ scalaire provoque l'inflation, cette phase d'expansion ne peut pas prendre fin, parce qu'elle est alimentée par des fluctuations quantiques. Cela avait été découvert en 1983 par Paul Steinhardt et d'autres. L'expansion exponentielle ne s'interromprait que dans des régions limitées, où se formeraient des univers analogues au nôtre. Ces bulles forment un multivers. Le problème, pour

ESSENTIEL

• A 20 kilomètres au sud de Rome se trouve la zone volcanique des monts Albains.

• Les géophysiciens ont reconstitué l'histoire de ses éruptions au cours des derniers 200 000 ans. Ils ont ainsi prouvé que, contrairement aux légendes, aucune ne s'est produite pendant l'Antiquité.

• Ils constatent aussi que la croûte terrestre de toute la région est en train de s'élever.

• Cela les conduit à un modèle du fonctionnement volcanique des monts Albains.

• Il suggère que le grand volcan des monts Albains serait en train de redevenir actif.

MAÎTRE



FABRIZIO MARRA
géologue et chercheur
à l'Institut italien de géophysique
et de volcanologie (INGV),
à Rome



Le volcan aux portes de Rome

A 20 KILOMETRES DE LA «VILLE ETERNELLE», UNE ZONE VOLCANIQUE EST AU REPOS DEPUIS 36 000 ANS. MAIS SON HISTOIRE ÉRUPTIVE ET SON SOULÈVEMENT ACTUEL, D'ENVIRON DEUX MILLIMÈTRES PAR AN, SUGGÈRENT QU'ELLE REDEVIENT ACTIVE. FAUT-IL S'EN INQUIÉTER ?

Ce cratère, le lac d'Albano, a été formé il y a quelque 36 000 ans par une éruption explosive. Il se trouve dans les monts Albains, des collines volcaniques boisées situées à 20 kilomètres au sud-est du centre de Rome.

Une ville éternelle bordée de volcans? Depuis longtemps, des chercheurs avancent que des éruptions se sont produites au cours de l'histoire de Rome dans les monts Albains (*Colli albani* en italien), un ensemble de collines du Latium situé à seulement 20 kilomètres au sud-est de la cité. Ils se fondent entre autres sur Tite-Live (-59 à 17 de notre ère) qui, ayant mal interprété certains mythes, mentionna des « pluies de pierres » et autres « incendies dans la forêt albaine ». Du reste, même au début du siècle présent, il se trouve encore des chercheurs affirmant avoir prouvé que dans l'Antiquité des phénomènes volcaniques ont fait déborder de façon catastrophique un lac de cratère des monts Albains : le lac Albano.

Or il se trouve qu'entre 2003 et 2006, à la demande de la Protection civile italienne et de l'INGV, l'Institut italien de géophysique et de volcanologie, j'ai coordonné un projet stratégique d'évaluation des risques géologiques dans la région romaine. Au cours de ce projet, nous avons montré que ni les débordements catastrophiques du lac Albano ni les éruptions censées les avoir provoqués au cours de l'Antiquité ne sont prouvés. Pour autant, les recherches que j'ai menées ensuite avec de nombreux collègues de l'INGV, de l'université Sapienza à Rome, du CNR (Conseil national de la recherche italien) et de l'université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis, donnent raison à ceux qui ne se résignent pas à voir dans les monts Albains un volcan éteint. Nous avons tout récemment (en 2016) publié leur conclusion : cette zone volcanique donne des signes de réveil (*voir la bibliographie*)!

LE LAC ALBANO EST UN MAAFF

Avant d'aborder ce qui fonde cette conclusion, expliquons pourquoi le lac Albano n'a pu déborder pendant l'Antiquité. Ce lac est un maar, c'est-à-dire un cratère formé par l'explosion provoquée par la rencontre entre du magma ascendant et les nappes phréatiques. L'éruption achevée, il s'est empli d'eau. A-t-il ensuite débordé? Oui à en croire Tite-Live, qui évoque « une élévation inhabituelle des eaux du lac »; auparavant, Cicéron (106 à 43 avant notre ère) écrivit que le « lac d'Albano [...] dépassa son niveau habituel ». Selon Denys d'Halicarnasse (60 à 8 avant notre ère), qui vécut bien après ces événements légendaires, ces débordements se seraient produits en 398 avant notre ère et auraient entraîné la même année la construction de l'exutoire romain qui équipe le lac.

Réalisée dans le cadre du projet stratégique mentionné plus haut, l'étude de la façon dont fut creusé ce tunnel d'évacuation des eaux montre que jamais le lac n'a pu être assez haut

pour déborder. Les *fossore*, c'est-à-dire les mineurs romains qui réalisèrent l'excavation, s'étaient répartis en deux équipes, l'une creusant depuis l'intérieur du cratère et l'autre depuis l'extérieur. Une fois reliées les deux moitiés de tunnel, ils procédèrent à l'abaissement du fond du tunnel d'admission jusqu'au

Pas d'activité éruptive depuis le dernier événement survenu il y a 36000 ans

niveau du lac. Si l'on suppose que l'exutoire fut creusé l'année du débordement (Denys d'Halicarnasse) pour empêcher une nouvelle catastrophe, alors cela implique qu'en 398 avant notre ère, après avoir débordé, le niveau du lac est rapidement redescendu sous celui de l'entrée de l'exutoire. Or celui-ci se trouve quelque 70 mètres sous le bord le plus bas du cratère... Le lac a-t-il pu monter au point de déborder, puis redescendre la même année de 70 mètres pour retrouver son « niveau habituel » (Cicéron) indiqué par le départ de l'exutoire? C'est très peu plausible.

La théorie des débordements du lac Albano a par ailleurs semblé appuyée un moment par la découverte d'anciens sols sous des dépôts volcaniques. Leur datation au radiocarbone a en effet livré des âges compatibles avec une inscription dans la mémoire humaine. On a donc pensé que les dépôts volcaniques recouvrant ces paléosols témoignaient des éruptions associées aux inondations catastrophiques évoquées dans les légendes romaines.

Au cours du projet stratégique mené de 2003 à 2006, nous avons toutefois éliminé le moindre doute sur la présence de produits volcaniques de moins de 5000 ans dans les monts Albains. Après un dernier épisode éruptif survenu il y a 36000 ans, dans le cratère d'Albano justement, plus aucune éruption n'a eu lieu. Le manque de fiabilité de la datation des paléosols par le radiocarbone est par ailleurs apparu quand la datation par la méthode argon-argon des dépôts volcaniques les recouvrant a livré des âges compris entre 69000 et 36000 ans, soit précisément les dates des deux derniers cycles éruptifs des monts Albains.



BIOGRAPHIE



FABRIZIO MARRA est chercheur principal à l'INGV (Institut italien de géophysique et de volcanologie). Il a étudié les liens existant entre les glaciations, les variations du niveau de la mer et les processus sédimentaires dans la région romaine, ainsi que l'histoire éruptive des zones volcaniques entourant Rome, qui ont fourni à la ville les tufs et les pouzzolanes avec lesquels elle a été construite.

Ainsi, Tite-Live ne nous renseigne aucunement sur l'activité passée de la zone volcanique des monts Albains et, à ce stade, rien n'indique non plus qu'une quelconque éruption s'y soit produite dans l'Antiquité.

Du reste, nous avons aussi établi qu'aucune éruption n'a eu lieu dans les monts Albains au cours des derniers 36 000 ans. Ce fait constitue justement l'une des raisons allant dans le sens d'un réveil volcanique. Il ressort en effet de nos échantillonnages des produits éruptifs et de leurs datations que durant toute l'ère d'activité des monts Albains, les cycles éruptifs se déclenchent en moyenne tous les 41 000 ans; par ailleurs, quelles que soient leurs amplitudes, ils sont séparés par des périodes de repos d'une durée approximative de 38 000 ans. Le dernier cycle éruptif s'est produit dans le cratère d'Albano. Il a débuté il y a 41 000 ans pour se terminer il y a 36 000 ans. Ainsi, le temps qui s'est écoulé depuis la dernière éruption dans les monts Albains n'excède pas le temps moyen séparant deux cycles d'éruptions: il s'agit justement là de l'un des critères que l'on prend en compte pour déclarer actif un volcan.

Au cours des quinze dernières années, en collaboration avec le laboratoire Wiscar de l'université du Wisconsin à Madison et le Centre de

géochronologie de Berkeley en Californie – des laboratoires hautement spécialisés dans la datation des roches –, l'INGV a daté plus de 100 échantillons couvrant une grande partie des produits éruptifs affleurant dans la région de Rome. Près de vingt ans de travail avaient été nécessaires pour identifier ces roches, les échantillonner, puis les faire dater. C'est ainsi que nous avons reconstitué l'histoire éruptive des monts Albains depuis ses débuts il y a 900 000 ans (voir l'encadré page 44).

Aucun éjecta (c'est-à-dire produit éruptif éjecté) de plus de 600 000 ans n'a été trouvé en surface, mais il est possible de déduire de la composition de certaines roches volcaniques si des cycles éruptifs ont eu lieu avant leur formation. Leurs matrices incorporent en effet des xénocristaux – littéralement des «cristaux étrangers» –, isolés au sein de la population de cristaux produite par l'éruption qui les a formées. Les xénocristaux des roches des monts Albains attestent indirectement que des éruptions ont eu lieu dans ces collines dès 900 000 ans. En classant les xénocristaux des monts Albains par tranches d'âges, puis en les dénombrant, nous avons établi statistiquement que la fréquence de ces éruptions anciennes a culminé tous les 100 000 ans environ.

L'ACTIVITÉ S'INTENSIFIE

A partir de 600 000 ans dans le passé, l'activité des monts Albains s'intensifie et devient plus fréquente. La phase dite du Tuscolano-Artemisio débute alors: elle est fortement explosive, ce qui induit l'émission d'énormes coulées pyroclastiques. Ces nuées ardentes sont produites par l'effondrement du panache volcanique, c'est-à-dire de la colonne de cendre et de vapeur, haute de plusieurs kilomètres parfois, qui se forme lors d'une éruption explosive, telle la célèbre éruption plinienne qui a enseveli Pompéi et Herculaneum. Ces nuées dévalent les flancs du volcan dans toutes les directions, recouvrant de magma fragmenté et incandescent les régions environnantes jusqu'à de grandes distances.

Pendant la phase du Tuscolano-Artemisio, la zone de Rome a été à plusieurs reprises entièrement recouverte de dépôts pyroclastiques, parfois de plusieurs mètres d'épaisseur. Ils constituent les célèbres tufs et autres pouzzolanes (les tufs sont de véritables roches; les pouzzolanes des sables consolidés) extraits de carrières à ciel ouvert ou souterraines (*arenari*) dont se servent les habitants du Latium depuis l'Antiquité pour construire.

Durant la phase du Tuscolano-Artemisio débutant il y a 561 000 ans, cinq grands cycles éruptifs se produisent, que séparent des intervalles de 30 000 à 45 000 ans. Cette régularité est une particularité des monts Albains. Elle est maintenue pendant toute leur histoire.

La zone volcanique des monts Albains se trouve tout près d'une région très urbanisée. Le lac d'Albano (en bas à droite) est entouré de communes de la banlieue de Rome, lesquelles jouxtent directement une partie de Rome (non visible).



eruptive, malgré la diminution progressive de l'intensité des cycles éruptifs.

Une longue période de repos de 57000 ans suit la phase du Tuscolano-Artemisio. Ensuite commence la phase des Faete avec ses très nombreuses éruptions stromboliennes. On désigne par cette expression dérivée du nom du volcan Stromboli (l'une des îles Éoliennes) les éruptions constituant une activité éruptive moyennement explosive accompagnée de projections de cendres et lapilli (éjectas constitués de petites pierres). Accompagnées de diverses

coulées de lave, ces éruptions ont entraîné la formation de nombreux petits édifices volcaniques (cônes de scories) répartis dans toute la zone volcanique. Pour modérée qu'ait été l'activité pendant la phase des Faete, elle a été très étendue et s'est poursuivie pendant 58000 ans (voir l'encadré ci-dessous).

Parmi les épanchements de lave de la phase des Faete, la grande coulée de Capo di Bove se distingue par son importance (voir la figure ci-dessous). Émise il y a 278000 ans par un cratère placé sur le flanc nord-ouest de la caldeira de

HISTOIRE D'UNE ZONE ACTIVE

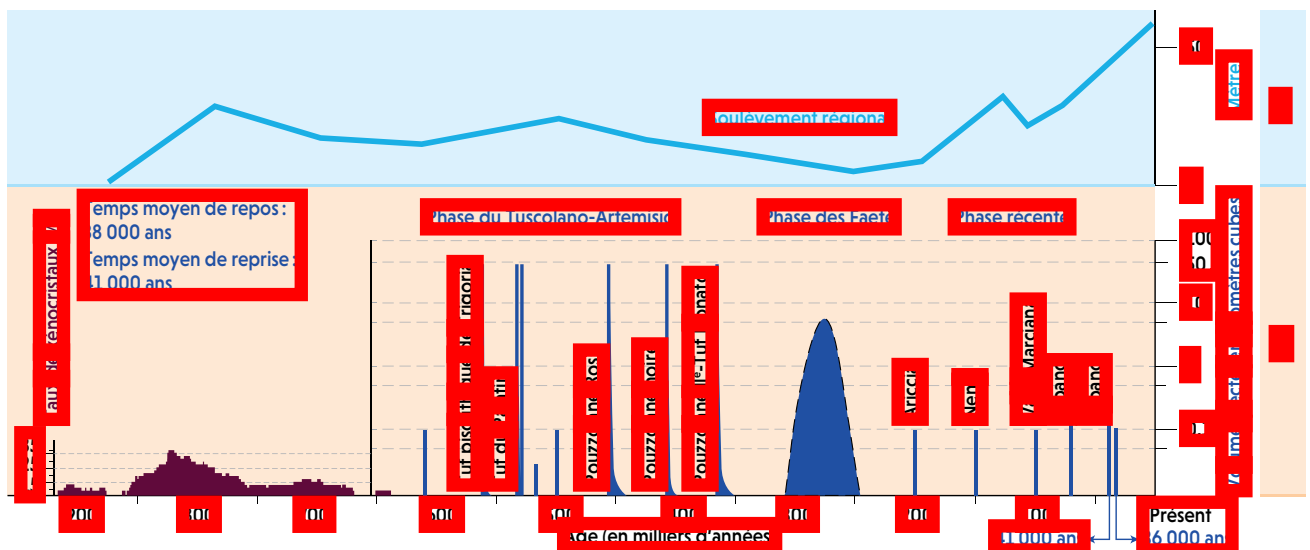
Le schéma ci-dessous résume les faits qui font penser que les monts Albains seraient en train de redevenir une zone volcanique active. Pendant toute l'ère d'activité de ce volcan, de grandes phases d'activité se sont succédé.

Les deux premières phases des derniers 600 000 ans – la phase du Tuscolano-Artemisio et celle des Faete – portent le nom des édifices volcaniques qu'elles ont laissés. Durant ces grandes phases d'activité, des cycles éruptifs plus ou moins amples se sont suivis à un rythme régulier (A). Le temps moyen qui s'écoule entre le début d'un cycle éruptif et le début du suivant est de l'ordre de 41 000 ans. Depuis 600 000 ans, 13 cycles éruptifs d'une durée de quelques milliers d'années se sont succédé ; ils sont représentés par les petites barres verticales. Exprimés en milliers d'années, les âges des éruptions ont été déterminés grâce aux isotopes de l'argon contenus dans leurs produits. Des périodes de repos presque absolu d'une durée moyenne de 38 000 ans séparent ces cycles éruptifs.

Le dernier a commencé au cratère d'Albano il y a 41 000 ans et s'est achevé il y a 36 000 ans, ce qui implique que la période qui s'est écoulée entre le début du dernier cycle éruptif et

aujourd'hui (41 000 ans) est du même ordre que la période au bout de laquelle l'activité volcanique des monts Albains revient. Les 56 000 ans écoulés depuis la fin du dernier cycle éruptif sont du même ordre que le temps moyen de retour à l'activité depuis 900 000 ans, mais dépasse sa valeur au cours des derniers 600 000 ans, qui n'a été que de 31 000 ans. Ces constatations suggèrent fortement que le système volcanique des monts Albains doit être considéré comme actif et peut-être sur le point de déclencher de nouvelles éruptions.

Or, dans le même temps, le lent soulèvement de toute la région apparaît semblable à ceux qui ont précédé le début de l'activité volcanique. Dans les monts Albains il y a 800 000 ans et le début de la phase explosive du Tuscolano-Artemisio il y a 600 000 ans (B). Ce soulèvement a commencé il y a 200 000 ans pour culminer avec la nouvelle phase d'activité du cratère d'Albano. Il atteint 2 millimètres par an dans la région des monts Albains. Au cours des deux derniers millénaires, le champ de pression régnant dans la croûte terrestre des monts Albains a cessé d'être compressif pour devenir extensif : une situation qui favorise l'ouverture des failles et des fractures et la remontée du magma depuis les profondeurs.



Fuscolano-Artemisio (une caldeira est une dépression due à la «vidange» d'une chambre magmatique sous-jacente), elle a avancé en ligne droite sur plus de dix kilomètres en direction du site de Rome, ne s'arrêtant que sur le lieu de ses futures portes. Or c'est justement de la porte de Saint-Sébastien, le long de la partie sud-est du mur d'Aurélien qui entoure le centre historique de Rome, que part la voie Appienne (*Via Appia*). Cette ancienne voie consulaire (grande voie de l'Empire) court le long de la crête de la coulée, la parcourt dans son ensemble, puis continue vers Naples. Les *basoli*, c'est-à-dire les pavés de lave de la voie Appienne et de nombreuses autres voies consulaires, ont été tirés de la lave leucitique de la coulée de Capo di Bove (les nombreux cristaux blancs de leucite qu'elle contient lui ont valu le nom d'«œil de poisson» ou d'«œil-de-perdrix»). Plus récemment, les leucitites albaines ont fourni le matériau des fameux *sampietrini*, les pavés qui recouvrent aujourd'hui encore un grand nombre des voies de Rome.

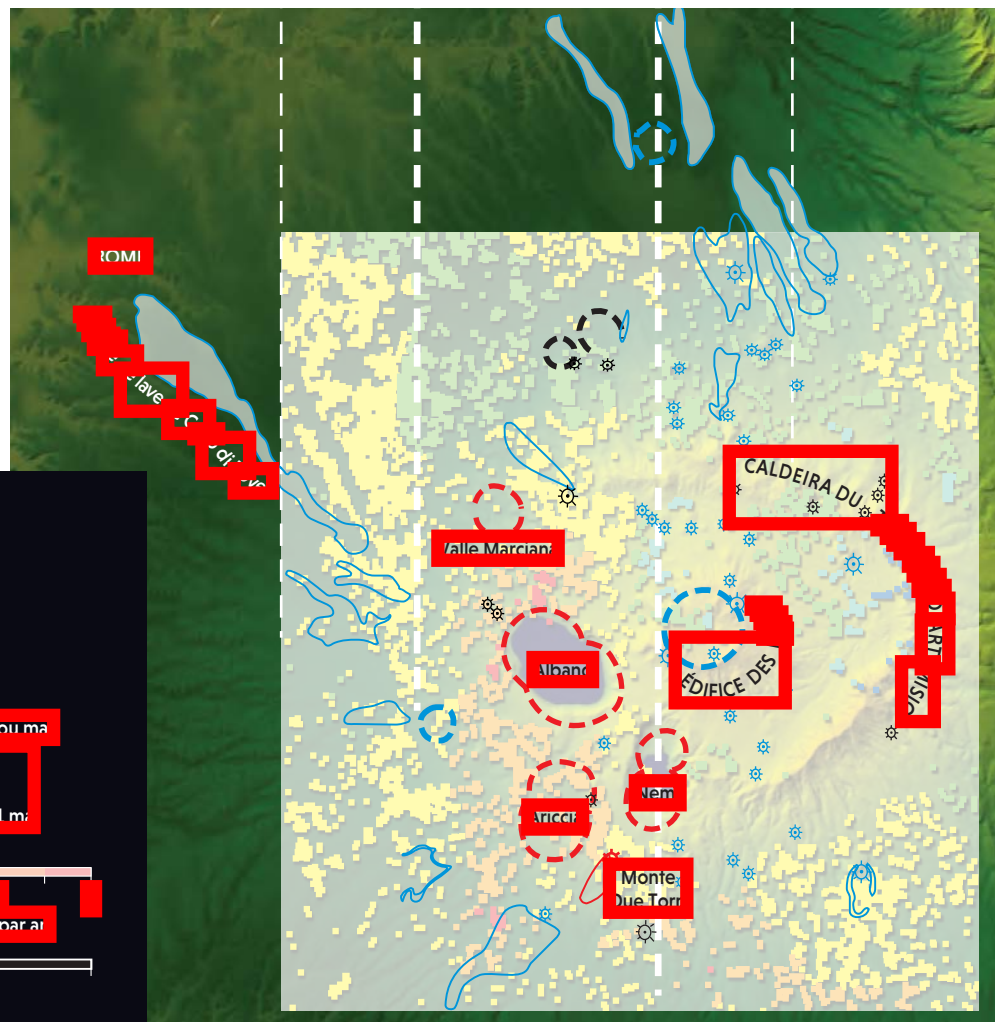
La dernière éruption effusive de la phase des Faete a été suivie par une inactivité de près

de 40000 ans. Puis, à partir d'il y a 200000 ans, la «phase récente» commence. Une activité explosive s'établit dans le cratère d'Ariccia, l'un des centres éruptifs des monts Albains situé à seulement deux kilomètres au sud de celui d'Albano. Pendant les éruptions de la phase récente, du magma interagit avec de l'eau infiltrée par des failles, et cela produit ce que l'on appelle des «surges volcaniques», c'est-à-dire des nuées ardentes d'ampleur.

Ces grandes coulées pyroclastiques produisent des cendres et des lapillis stratifiés, qui se déposent radialement autour du cratère à la faveur des explosions répétées dues aux montées successives en pression de la vapeur produite par le contact entre l'eau des nappes phréatiques et le magma. Lors d'une explosion, des anneaux de vapeur portant de la cendre s'élèvent et s'étendent comme le nuage d'une explosion nucléaire. Ce phénomène atmosphérique alterne avec les coulées pyroclastiques, qui se forment chaque fois que se créent des panaches volcaniques assez hauts.

Dans l'ensemble, l'activité de la phase récente a été plus modérée que pendant la

Le soulèvement mesuré par télémétrie satellitaire (points *pastels*) est de 2 à 3 millimètres par an. La surface qui se soulève le plus coïncide exactement avec la zone des cratères ayant été actifs le plus récemment.





Les roches volcaniques dont sont constitués l'aqueduc de Claude à Rome (ci-dessus) et la voie Appienne (à droite) proviennent soit de tufs (débris volcaniques consolidés), soit de coulées de lave des monts Albains. Elles ont fourni des informations sur l'histoire éruptive de cette zone volcanique.

phase du Tuscolano-Artemisio, même si elle a aussi été très explosive et accompagnée de projection de lapillis à très grandes distances. Comme pendant la phase du Tuscolano-Artemisio, les cycles éruptifs de la phase récente se sont manifestés à chaque fois dans un cratère différent et ont été séparés par des périodes de repos régulières de 50 000 ans environ. Ainsi, l'activité du cratère d'Ariceia a été suivie, il y a 150 000 ans, par celle du cratère voisin de Nemi, puis celle-ci à son tour, il y a environ 100 000 ans, par celle du val Marciana, situé à quelques kilomètres au nord d'Albano.

À partir d'il y a 69 000 ans, toutefois, il semble que la fréquence des retours d'activité ait augmenté, puisque le nouveau cycle éruptif s'est déclenché après quelque 30 000 ans, exactement comme pendant les premières grandes éruptions de la phase du Tuscolano-Artemisio. Dans le même temps, l'intensité des éruptions croissait. Deux cycles explosifs survinrent au cratère d'Albano, produisant des coulées pyroclastiques de dimensions notables, telle celle d'il y a 36 000 ans à l'origine du dépôt dit du *peperino de Marino*, ou du *peperino albano*. Il s'agit d'une roche très dure, que les Romains employaient volontiers pour réaliser des sarcophages et le soubassement de temples. Elle doit son nom à son aspect «poivre et sel» caractéristique (*peperino* signifie «petit poivre»), créé

par la présence dans cette roche de très nombreux grains noirs (cristaux de pyroxène) et blancs (cristaux de leucite).

Les éjectas des deux cycles éruptifs d'Albano, survenus le premier il y a 69 000 ans et le second entre 41 000 et 36 000 ans, ont franchi des distances considérables, tant vers Rome qu'en direction du nord-est. Quatre cônes d'éjection ont même dépassé les limites de la caldeira du Tuscolano-Artemisio; à l'heure actuelle, nous pouvons en retrouver des traces jusque dans les bassins montagneux de l'Apennin central, tel le Fucino et la plaine de Sulmona, qui sont à plus de 100 kilomètres... Ce retour de l'intensité et de gros volumes éjectés durant le dernier cycle éruptif se manifeste aussi par la grande étendue de l'activité. Elle se traduit par l'apparition de l'édifice volcanique du Monte Due Torri, à environ deux kilomètres au sud des cratères d'Ariceia et de Nemi. Il y a 40 000 ans, ce volcan a projeté de la lave et des lapillis alors que dans le cratère d'Albano se produisaient en même temps de violentes éruptions phréato-magmatiques (dues à la rencontre d'eau et de magma).

UNE PHASE COMMENCE

Ces observations donnent à penser qu'à Albano, c'est une nouvelle phase volcanique, et pas seulement un nouveau cycle éruptif, qui débute. Il semble en effet que les phases d'activité des monts Albains commencent lorsque culmine le soulèvement de la région entière. Expliquons. Au cours des dernières 300 000 années, la côte donnant sur les monts



Albains et ceux du Latium septentrional (monts Sabatins, Vico et Volsins) a subi des soulèvements répétés coïncidant chaque fois avec le début de phases volcaniques.

En particulier, un soulèvement très important est survenu il y a entre 900 000 et 800 000 ans, en même temps que le début des premières phases d'activité volcanique; un second soulèvement s'est produit il y a 600 000 à 500 000 ans, au début de la phase explosive du Tuscolano-Artemisio. Enfin, la dernière phase de soulèvement s'est produite en deux étapes: la première coïncide avec le début de la phase volcanique récente; la deuxième, plus marquée, avec le fort regain d'activité en termes de volumes et de fréquence, qui caractérise les deux cycles éruptifs d'Albano et Monte Due Torri. Selon nous, ces soulèvements régionaux peuvent être mis en relation avec des remontées de magma à l'origine des monts Albains, lesquelles provoquent un «gonflement» de la croûte terrestre. Une impression que confirme l'étude de l'évolution géochimique du magma éjecté à partir d'il y a 69 000 ans.

Or des recherches récentes en tectonique et en paléogéographie révèlent que la région de Rome est en train de se soulever. En outre, les études de télémétrie satellitaire effectuées à l'INGV montrent qu'un soulèvement de la zone volcanique des monts Albains s'ajoute au mouvement général de la région. De 2 à 3 millimètres par an au cours des vingt dernières années, ce soulèvement continu se produit exactement dans la zone où sont survenues les éruptions les plus récentes. Il se concentre par ailleurs dans un secteur bordé par deux zones de faille limitant une portion de croûte terrestre allongée dans la direction nord-sud (voir la figure page 45). Ce morceau de croûte porte les centres éruptifs de la phase récente. Tout cela conduit à l'hypothèse que du nouveau magma serait en train de s'accumuler sous cette zone, ce qui expliquerait son «gonflement».

La réévaluation d'études de tomographie sismique (sorte de scanographie de la croûte terrestre) menées par le passé à l'occasion de l'arrivée des ondes de tremblements de terre récents suggère que cette zone d'accumulation du magma pourrait se trouver entre 5 et 10 kilomètres de profondeur. C'est assez profond pour ne pas susciter d'inquiétudes immédiates, mais compatible avec la présence d'une chambre magmatique.

Une autre observation importante provient de l'étude des causes des longues périodes d'inactivité séparant les différentes éruptions des monts Albains. Les recherches effectuées ont révélé que le comportement des monts Albains se distingue nettement de celui des autres zones volcaniques d'Italie centrale ayant été actives en même temps. Cette différence semble liée à la tectonique particulière

de la région de Rome. Les forces qui s'exercent sur la croûte terrestre sont en effet compressives, alors qu'elles sont extensives dans les régions voisines. La compression horizontale que l'on observe dans la région de Rome a pour effet d'y sceller les fractures et les failles par lesquelles le magma remonte pendant les éruptions. Le magma produit sous la région de Rome reste donc en profondeur jusqu'à ce que son accumulation progressive ait engendré des pressions dépassant celles que les forces compressives exercent sur les failles. Une fois ce seuil atteint, la poussée verticale due à l'accumulation de magma ouvre les failles et les fractures: le champ de pression devient alors extensif, malgré la compression due à la tectonique, et un nouveau cycle éruptif commence.

Menées il y a plusieurs années par des chercheurs de l'INGV, des recherches en géologie structurale ont permis de comprendre que la région de Rome est passée d'un état de compression à l'état d'extension actuel, et que cette inversion s'est produite il y a moins de 2000 ans. Ces collègues ont en effet observé les déformations horizontales qu'induit une compression sur un aqueduc romain du II^e siècle (voir la photographie page précédente). Ces déformations montrent que le champ de pression existant après la construction de l'ouvrage comprimait la croûte terrestre régionale.

Les choses ont changé depuis. Aujourd'hui, les indicateurs géophysiques témoignent de l'existence d'un champ de pression extensif, qui tend à élargir les fractures de la croûte terrestre sous les monts Albains et dans la région romaine. Ces observations suggèrent qu'une remontée de magma pourrait être responsable du soulèvement actuel des monts Albains.

UNE ERUPTION PEUT-ETRE DANS QUELQUES SIÈCLES

Prédire quand se produira une éruption est impossible, mais c'est une question de siècles ou de millénaires. De plus, nous n'avons pour le moment aucune certitude quant à l'existence d'une chambre magmatique sous les monts Albains! Le soulèvement observé dans la zone des cratères récents pourrait en effet s'expliquer aussi par la présence souterraine de fluides et de gaz sous pression. Une nouvelle tomographie sismique de la région suivie par une modélisation numérique de la source de la déformation nous aidera à clarifier les raisons du soulèvement continu en cours dans la zone des cratères récents.

Nous verrons ce qu'il en est, mais il importe déjà de placer les monts Albains sous surveillance constante, afin que les signaux d'une future éruption puissent être enregistrés à temps par nos arrières-arrières-arrières... petits-enfants. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Marra et al., **Assessing the volcanic hazard for Rome: ⁴⁰Ar/³⁹Ar and In-SAR constraints on the most recent eruptive activity and present-day uplift at Colli Albani Volcanic District**, *Geophysical Research Letters*, vol. 43(13), pp. 6898-6906, 2016.

G. D'Ambrosio et al., **L'attività recente del centro eruttivo di Albano tra scienza e mito: un'analisi critica del rapporto tra il vulcano laziale e la storia dell'area albana**, atti del convegno Lazio e Sabina, questo incontro di studi sul Lazio e la Sabina, pp. 125-136. Rome, 2010.

J. Martel, **Les crises de la montagne Pelée**, *Pour la Science* n° 439, mai 2014.



L'ESSENTIEL

► Avec l'arrivée des voitures autonomes, les systèmes de déplacement urbain connaîtront sans doute des changements profonds.

► Ces transformations dépendront des comportements adoptés par les usagers et des orientations données par les autorités.

► Le nombre de voitures et les aires de stationnement pourraient diminuer considérablement grâce à l'autonpartage et au covoiturage.

► Plusieurs difficultés potentielles sont à anticiper : problèmes de sécurité, étalement urbain accru, déséquilibres financiers...

LES AUTEURS



CARLO RATTI
directeur du Senseable City Lab au MIT (États-Unis)
et créateur du studio de design Carlo Ratti Associati



ASSAF BIDERMAN
directeur adjoint du Senseable City Lab
et créateur de la société Supernodestrian

Vers la fin des parkings

L'UTILISATION DE RESEAUX DE VEHICULES AUTONOMES ET DE CARREFOURS INTELLIGENTS TRANSFORMERA EN PROFONDEUR LES TRANSPORTS ET PAYSAGES URBAINS. POUR UNE MEILLEURE QUALITÉ DE VIE DANS LES VILLES ? OUI, MAIS À CONDITION D'ÉVITER LES PIÈGES QUI GUETTENT.

Les voitures et les villes entretiennent une relation complexe. Nous avons aujourd'hui tendance à les considérer comme de plus en plus incompatibles, étant donné l'engorgement croissant des routes et la pollution de l'air toujours plus élevée. Mais au cours du xx^e siècle l'automobile a profondément marqué la planification urbaine. Comme l'architecte d'origine suisse Le Corbusier le déclarait dans son ouvrage *Urbanisme* paru en 1924 : « L'automobile [...] a complètement bouleversé toutes nos vieilles idées sur l'aménagement urbain. »

Près de cent ans plus tard, nous nous trouvons à un tournant similaire. Tout d'abord, on s'attend à ce que la demande en transports urbains fasse plus que doubler d'ici à 2050, ce qui signifie que nous devons plus que doubler la capacité des routes pour simplement maintenir l'engorgement aux niveaux actuels (et souvent inacceptables). Ensuite, grâce à la convergence rapide des technologies de l'information et de la communication, de la robotique et de l'intelligence artificielle, nos

systèmes de déplacement – voitures, autobus et autres moyens de transport – connaissent des transformations importantes. Une fois encore, ils sont sur le point de modifier radicalement le paysage urbain.

Les voitures sans conducteur, ou « voitures autonomes », sont en première ligne. Au cours des dernières décennies, les voitures sont passées des types de systèmes mécaniques que Henry Ford aurait pu reconnaître à de véritables ordinateurs sur roues. La voiture ordinaire d'aujourd'hui est équipée d'une batterie de capteurs qui collectent des données internes et externes afin de rouler en sécurité et avec efficacité. Des sociétés telles que Waymo (issue de Google), Cruise Automation (acquise par General Motors), Otto (acquise par Uber), Zoox et nuTonomy expérimentent de nouveaux capteurs qui peuvent « voir » une rue quasiment comme nos yeux le font. Une fois que vous avez entré ces informations dans un système d'intelligence artificielle embarqué, vous obtenez un véhicule complètement autonome, capable de naviguer dans un trafic dense sans la moindre intervention humaine.

DES CARREFOURS SANS FEUX, À CONTRÔLE AUTOMATIQUE

Quand une voiture s'approche de l'intersection, elle émet un signal de demande d'accès au système de gestion du carrefour, via un réseau wifi. Ce signal horodaté inclut les détails du trajet. Ici, la voiture rouge ① entre la première dans la zone de signalisation, suivie par la voiture orange ②, puis par les voitures jaune ③ et verte ④.

Seul à partir duquel l'accès au carrefour est demandé

Carrefour

Trajets prédéfinis

Voiture s'approchant de la zone de signalisation

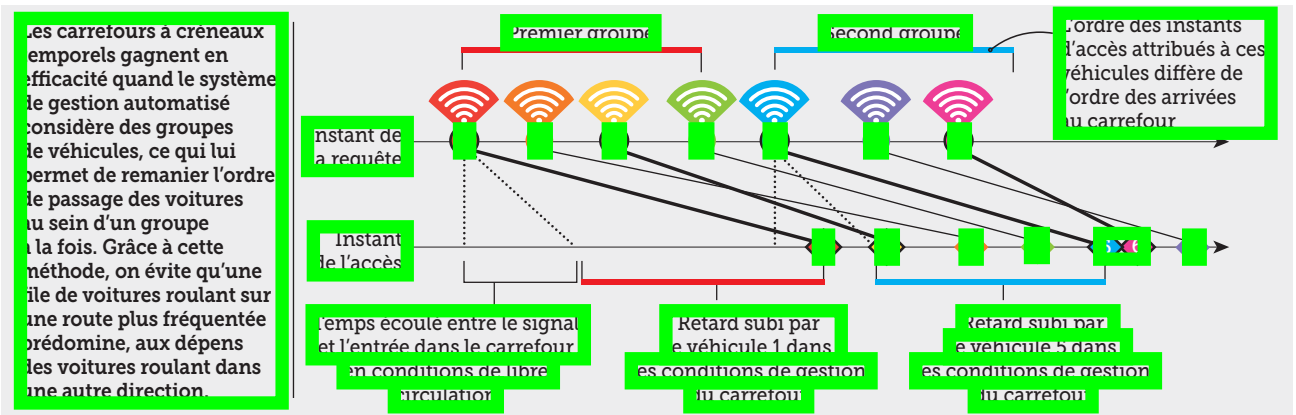
Distance de sécurité

Distance d'arrêt

Pour des raisons de sécurité, deux véhicules qui se suivent dans un même flux doivent respecter une distance de sécurité. Les véhicules appartenant à des flux différents sont séparés par la distance qui leur serait nécessaire pour s'arrêter.

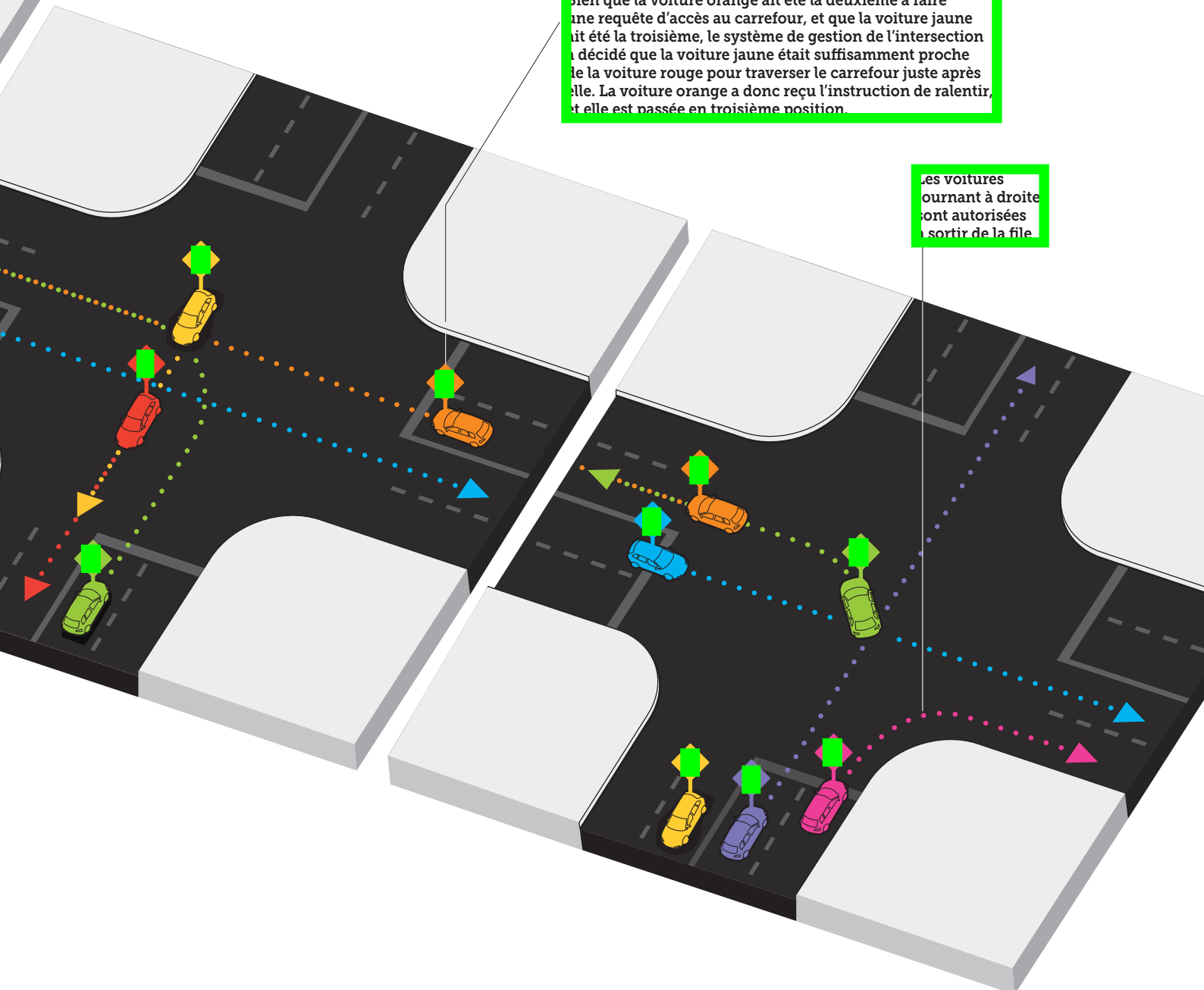
Un second groupe, conduit par la voiture bleue ⑤, s'approche du carrefour.

Avec les véhicules autonomes, les urbanistes pourront remplacer les feux tricolores par des carrefours gérés par « creneaux temporels », où chaque véhicule se voit attribuer une fenêtre de temps durant laquelle il peut traverser l'intersection. Les études indiquent que ces carrefours à feux tricolores gérés par ordinateur pourraient permettre à tous les véhicules de traverser l'intersection, dans un même laps de temps.



Même si la voiture orange ait été la deuxième à faire une requête d'accès au carrefour, et que la voiture jaune ait été la troisième, le système de gestion de l'intersection a décidé que la voiture jaune était suffisamment proche de la voiture rouge pour traverser le carrefour juste après elle. La voiture orange a donc reçu l'instruction de ralentir, et elle est passée en troisième position.

Les voitures tournant à droite sont autorisées à sortir de la file.



Les véhicules autonomes libéreront une grande partie du temps que nous passons chaque jour à conduire, et ils rendront nos routes plus sûres. À l'évidence, ils vont changer les règles du jeu en vigueur dans nos villes. Mais de quelles façons? C'est loin d'être établi.

D'un côté, on peut imaginer que davantage de personnes se mettront à partager ces véhicules, lesquels transporteront alors un passager après l'autre, tout au long de la journée. Dans ce cas, nos cités pourraient poursuivre leur activité en utilisant une petite fraction seulement des véhicules actuellement en service.

D'un autre côté, nous pourrions connaître les scénarios plus « dystopiques », c'est-à-dire relevant d'une utopie qui vire au cauchemar. L'Américaine Robin Chase, cofondatrice et ancienne directrice générale de Zipcar, une société de service d'autopartage (voitures en libre-service), a mentionné dans ses écrits « des voitures zombies – celles avec personne à bord – qui obstruent nos villes et nos routes » faisant craindre le chômage pour les chauffeurs professionnels, une perte de revenu pour l'infrastructure des transports, et « un cauchemar de pollution, d'engorgement routier et d'agitation sociale ».

Alors, nirvana technologique ou dystopie urbaine? Pour s'attaquer à cette question, nous devons explorer les façons dont les véhicules autonomes pourraient modifier nos paysages urbains et les façons dont on s'y déplace.

L'ECONOMIE DE PARTAGE

En moyenne, les voitures sont immobilisées (au garage ou sur une place de stationnement) 96% du temps. Ce sont donc des candidates idéales pour l'économie de partage. Le potentiel de réduction de l'encombrement des routes est énorme. Une poignée de systèmes d'autopartage tels que Zipcar et car2go ont déjà un impact important sur le nombre total de véhicules dans nos villes: des spécialistes ont estimé que chaque véhicule partagé retire des rues entre 9 et 13 voitures particulières.

Ces avantages augmenteront de façon exponentielle à mesure que les véhicules autonomes, actuellement disponibles dans des versions expérimentales, gagneront une part notable du marché et estomperont la distinction entre modes de transports privés et publics. « Votre » voiture pourrait vous emmener au travail le matin, puis, au lieu de rester dans un parc de stationnement, conduire quelqu'un d'autre de votre famille ou de votre réseau de connaissances.

En conséquence, la durée d'utilisation de chaque véhicule pourrait passer de 1 à 24 heures par jour. Un article récent de nos collègues du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) rapporte que, dans de



Les voitures sont parquées 96 % du temps. Corollaire: les places de stationnement et les parkings occupent des surfaces considérables, au détriment d'autres installations ou activités.

elles conditions, la demande en mobilité d'une ville telle que Singapour – qui offre l'une des premières flottes de voitures autonomes du monde, accessibles au public – pourrait être satisfaite avec seulement 30 % de ses véhicules actuels. En plus du partage du véhicule, l'autonomie pourrait donner un nouvel essor au covoiturage. Des applications telles que Via, uberPool et Lyft Line permettent à plusieurs personnes de partager le même voyage, ce qui réduit les coûts d'exploitation et les tarifs individuels. L'autonomie pourrait dynamiser encore plus le covoiturage, tous les déplacements pouvant être gérés en ligne. Les analyses réalisées par notre laboratoire (Senseable City Lab) au MIT montrent que le covoiturage a un potentiel significatif dans les villes.

La ville de New York, par exemple, est toute faite pour le partage. Le projet HubCab de notre laboratoire a réuni les données provenant de 170 millions de courses effectuées par 13 500 taxis Medallion (les célèbres taxis jaunes) de la ville – spécifiquement, les coordonnées de géolocalisation des lieux de prise en charge et dépôt du client, avec les durées de trajet correspondantes. Nous avons ensuite élaboré un modèle mathématique pour déterminer l'effet potentiel du covoiturage appliqué à ces courses. Ce projet a introduit le concept de « réseaux de partageabilité », permettant



l'optimiser les possibilités de covoiturage. Nos résultats quantitatifs montrent que le partage des taxis pourrait réduire le nombre global de voitures de 40 %, les passagers ne subissant que des retards minimes. D'autres travaux ont montré que des villes telles que San Francisco, Vienne et Singapour pourraient tirer des avantages du même ordre.

Qui plus est, en combinant l'autopartage et le covoiturage, une ville pourrait s'en sortir avec juste 20 % du nombre de voitures actuellement en circulation, ses habitants voyageant à la demande. Bien sûr, ces réductions sont théoriques. Dans la vie réelle, elles dépendraient du degré de bon vouloir des gens à adopter le covoiturage et des voitures autonomes. Mais toute chute du nombre de véhicules diminuerait les coûts et l'énergie investis dans la construction et l'entretien des infrastructures de transport. Des voitures moins nombreuses, cela pourrait également signifier des temps de trajet plus courts et un impact environnemental plus faible.

NI PARKINGS NI FEUX TRICOLORES

Les voitures autonomes ne nécessiteront pas de nouvelles infrastructures urbaines (des routes spécialement conçues, par exemple), mais elles entraîneront d'autres changements notables. Considérons le stationnement. Aux États-Unis, l'infrastructure du stationnement couvre plus de 20 000 kilomètres carrés, une surface presque aussi vaste que l'État du New Jersey. Si davantage de véhicules étaient partagés, nous aurions besoin de beaucoup moins de places de stationnement. Quelles en seraient les conséquences ?

Au cours du temps, il serait possible de réaffecter de vastes et précieux terrains urbains, actuellement occupés par des parcs de stationnement, à d'autres fonctions sociales. Le *Park(ing) Day*, événement annuel qui s'est tenu pour la première fois à San Francisco en 2005, donne quelques idées. Chaque année, dans le cadre de cet événement, des artistes, des designers et des citoyens sont invités à transformer des parkings à horodateurs en lieux publics temporaires. Dans le passé, des participants ont ainsi mis du gazon et placé des arbres et des bancs le long des trottoirs.

À une échelle beaucoup plus grande et sur une base permanente, les parcs de stationnement vacants pourraient être reconvertis pour offrir des équipements publics tels que des aires de jeux, des parcours de santé ou des pistes cyclables.

D'autres éléments courants du paysage urbain pourraient disparaître. Prenez les feux de signalisation (ou feux tricolores), une technique vieille de cent cinquante ans conçue à l'origine pour éviter que les voitures à chevaux

entrent en collision. Des véhicules autonomes équipés de capteurs, capables de communiquer entre eux pour maintenir des distances de sécurité, auront besoin de moins d'assistance aux carrefours. En conséquence, des intersections gérées par créneaux temporels, conçus à la façon des systèmes de contrôle du trafic aérien, pourraient remplacer les feux tricolores. À l'approche d'un carrefour, un véhicule contacterait automatiquement un système de gestion du trafic pour demander un accès. Le système lui assignerait alors un temps déterminé, ou « créneau temporel », pour traverser le carrefour (voir l'illustration pages 50-51).

Des intersections gérées par créneaux temporels réduiraient notablement les files d'attente des voitures et les ralentissements, comme l'a démontré notre projet *Light Traffic*. Les analyses montrent que les systèmes d'attribution en temps réel de créneaux temporels permettraient à deux fois plus de véhicules de traverser un carrefour, dans la même durée, que ne le font habituellement les feux tricolores. Cela aurait un impact majeur sur le réseau routier de n'importe quelle ville. Les temps de trajet et d'attente chuteraient ; la consommation de carburant baisserait ; et moins de circulation par à-coups (alternance de freinages et d'accélération) signifierait moins de pollution atmosphérique. Bonus supplémentaire, les intersections gérées par créneaux temporels sont suffisamment souples pour s'adapter aux piétons et aux cyclistes qui partagent la route.

Il convient de noter qu'une vision aussi réduisante ne dépend pas seulement de voitures autonomes et de systèmes intelligents de gestion du trafic. Elle nécessite aussi une coordination du marché bien meilleure. Les sociétés actuelles de covoiturage ont des plateformes indépendantes qui ne se concertent pas. Les clients ne peuvent pas comparer facilement les différentes options et les conducteurs ne peuvent pas profiter d'une demande globale. La situation est similaire à ce qu'était le secteur du transport aérien avant Internet, un secteur où les passagers peuvent aujourd'hui comparer de nombreuses possibilités de vols par l'intermédiaire de plusieurs systèmes de diffusion globale qui suivent les normes établies par l'Open-Travel Alliance, et ainsi bénéficier d'une transparence et d'une concurrence accrues.

Dans les villes, deux approches sont susceptibles de créer une architecture de déplacement similaire. La première serait un effort « de bas en haut », où de petits acteurs du secteur commencent à adopter des normes communes. C'est ce qui commence à voir le jour avec une collaboration entre Lyft, aux États-Unis, Didi Chuxing, en Chine, Ola, en Inde, et GrabTaxi,

en Asie du Sud-Est. La seconde serait un effort «de haut en bas», mené par un gouvernement ou un organisme mondial, à l'instar du World Wide Web Consortium. Les services de transport étant déjà fortement régulés dans la plupart des pays, cela ne devrait pas être trop compliqué. Dans le cadre de l'une ou l'autre de ces approches, il serait possible de créer une plateforme de transport et de logistique à la fois puissante et transparente.

Les véhicules autonomes risquent aussi d'aggraver l'étalement urbain

L'autonomie des véhicules et le covoiturage sont à même d'introduire des changements extrêmement positifs dans le transport urbain. Mais si la transition vers la ville sans conducteurs n'est pas gérée prudemment, elle pourrait aussi avoir des conséquences négatives.

DES ECUEILS À ÉVITER

Le premier souci est la sécurité. Nous savons tous qu'un virus peut mettre en panne un ordinateur. Que se passera-t-il si un virus affecte le fonctionnement d'une voiture autonome? Le piratage malveillant est difficile à combattre avec les outils classiques à la disposition des industriels et des gouvernants, et il est particulièrement dangereux dans le cas de systèmes, tels que les voitures autonomes, qui combinent les technologies numériques et matérielles.

Des problèmes supplémentaires pourraient naître de ce que l'on pourrait appeler l'«abus de position dominante» des véhicules autonomes. Le coût du trajet au kilomètre pourrait chuter de façon si substantielle que les gens abandonneraient les transports publics au profit des voitures autonomes. Ce phénomène entraînerait à son tour une augmentation du nombre de véhicules en ville, avec pour conséquence de terribles embouteillages. En outre, le fait de maintenir des voitures en mouvement toute heure plutôt que parkées 96 % du temps pourrait accroître la pollution.

Les voitures autonomes risquent d'avoir un autre effet inattendu: l'aggravation de

l'étalement urbain. Ce ne serait pas la première fois qu'une innovation technologique dans le domaine des transports entraînerait un tel effet. Dans son ouvrage *Sur les quatre routes*, paru en 1941, Le Corbusier décrivait comment cela s'est déroulé dans les premières décennies du xx^e siècle: «Le chemin de fer a transformé les villes en véritables aimants; elles se remplissaient et enflaient sans contrôle, et la campagne était progressivement abandonnée. C'était un désastre. Heureusement, l'automobile, grâce à l'organisation de ses Os, va rétablir cette harmonie rompue et commencer le repeuplement de la campagne.» Dans l'avenir, qu'en sera-t-il si les gens, devenus capables de faire des allers et retours domicile-travail tout en dormant ou en travaillant, décident de déménager à l'extérieur de la ville, en consommant des terres et en développant des zones résidentielles non viables?

Quelques autres menaces méritent d'être mentionnées. Les amendes, les tickets de stationnement et les diverses taxes liées à l'automobile représentent une source substantielle de revenus pour les diverses autorités locales ou nationales. Une utilisation généralisée de véhicules autonomes risque d'éliminer cette manne financière. On peut aisément imaginer ce qui arriverait pour les infrastructures routières des États-Unis, déjà bien délabrées, si ce scénario se vérifiait!

Les villes pourraient peut-être compenser cela en réaménageant des parcs de stationnement devenus inutiles et en construisant de nouvelles infrastructures générant des revenus. Mais nous devons également avoir conscience que, dans le monde entier, des millions de chauffeurs travaillant aujourd'hui dans les métiers de la logistique et du transport urbain pourraient se retrouver au chômage.

Comme l'a écrit Robin Chase: «Supprimer simplement les conducteurs des voitures et conserver à l'identique tous les autres éléments de notre système sera un désastre.» Il est donc impératif que nous regardions ces nouvelles technologies avec un œil critique et que nous les guidions vers les objectifs sociétaux que nous souhaitons. Une bonne politique aiderait à éviter les fâcheuses conséquences que nous avons décrites. Comme cela a été le cas au xx^e siècle, beaucoup dépendra d'un cycle vertueux d'essais et d'erreurs.

Cependant, si nous parvenons à gérer cette transition de façon réfléchie, les voitures autonomes aideront à nous constituer une vie urbaine plus sûre et plus agréable. Ce faisant, elles pourraient finalement renforcer la principale mission de nos villes, qui remonte à l'apparition des premiers villages humains il y a quelque 10 000 ans: nous rassembler, indépendamment du type de véhicules avec lequel nous nous déplaçons. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. Tachet et al., **Scaling law of urban ride sharing**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 42868. 2017.

K. Tachet et al., **Revisiting street intersections using slot-based systems**, *PLoS One*, vol. 11(3), article e0149607. 2016.

E. Ratti et M. Claudet, **The City of Tomorrow**, Yale University Press. 2016.



vendredi 15 septembre à 11h

à la Cité des sciences et de l'industrie
Entrée libre dans la limite des places disponibles.

Entrée libre dans le

Évènement en direct
Cassini-Huygens: le Grand Finale
Assistez à l'ultime plongeon de Cassini
dans l'atmosphère de Saturne.

... près des nuages saturniens.

... la Nasa.

Dernières images captées au plus près des nuages saturniens.

Dernières images captées au plus près des nuages sautoir.

Bilan d'une mission de 30 ans issue de la collaboration entre la Nasa, l'Agence spatiale européenne (Esa) et l'Agence spatiale italienne (Asi) : les anneaux, l'atmosphère de Saturne et ses tempêtes géantes, sa magnétosphère et ses aurores spectaculaires, les lacs de méthane de Titan, l'océan sous la surface glacée d'Encelade...

... scientifiques, à Paris, et en direct du Jet Propulsion California.

En présence de scientifiques, à Paris, et en direct du Jet Propulsion Laboratory (JPL) à Pasadena, en Californie.

► **Conseillers scientifiques**: Régis Courtin, CNRS et Observatoire de Paris; Marcello Fulchignoni, université Paris-Diderot et Observatoire de Paris; Laurent Lamy, Observatoire de Paris; Jean-Pierre Lebreton, LPC2E CNRS-Université d'Orléans; Francis Rocard, Cnes.

► **Séance animée sur place** par Gilles Dawidowicz, Société astronomique de France, et Frédéric Castel, journaliste scientifique, en direct du JPL en Californie.

Événement retransmis en direct dans le hall de la Cité et sur réservation obligatoire à l'auditorium (cite-sciences.fr - rubrique - Conférences)

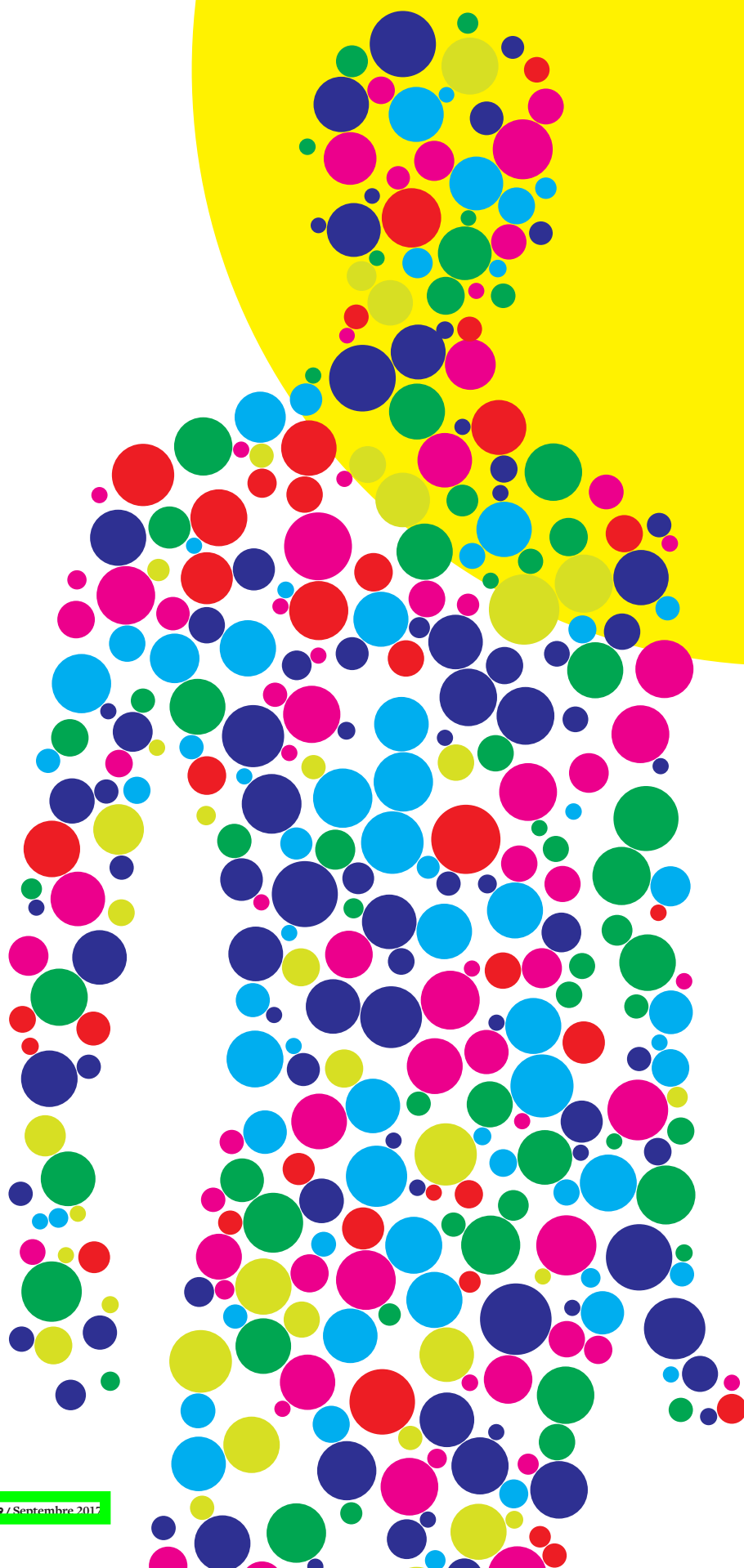
En partenariat avec



Avec le soutien de



programme complet sur **cite-science.fr**



MESSAGES

Le premier arbre généalogique cellulaire a été obtenu dans les années 1980 par le Britannique John Sulston. À l'aide d'un microscope, il a retracé le lignage de chaque cellule du ver *Caenorhabditis elegans*.

Aujourd'hui, des généticiens tentent d'établir la généalogie des cellules du corps humain.

En comparant les génomes des cellules d'un individu, ils déterminent leurs liens de parenté.

Etudier la filiation des cellules humaines devrait notamment aider à mieux comprendre l'apparition des cancers et leur évolution.

MAINTENANT



EWEN CALLAWAY
journaliste
à *Nature*

Suivre le devenir de chaque cellule du corps

LES BIOLOGISTES S'ATTAQUENT AUJOURD'HUI À UN DÉFI TITANESQUE : RETRACER LA FILIATION DE CHAQUE CELLULE LORS DU DÉVELOPPEMENT D'UN INDIVIDU, DE L'EMBRYON À L'ADULTE.

Au début des années 1980, durant 18 mois, John Sulston a passé ses journées à regarder grandir des vers. Chaque jour, au cours de deux sessions de quatre heures, John Sulston observait un embryon de *Caenorhabditis elegans* à l'aide d'un microscope optique et dessinait ce qu'il voyait toutes les cinq minutes : d'abord un seul œuf fertilisé, puis les deux cellules résultantes, puis quatre, huit et ainsi de suite. Il travaillait seul, dans son minuscule bureau au Laboratoire de biologie moléculaire du Medical Research Council, à Cambridge, au Royaume-Uni. Entre deux observations, il s'occupait avec un Rubik's cube. « Je me suis trouvé des distractions », s'est remémoré le biologiste Lauréat du prix Nobel, aujourd'hui retraité.

Ses centaines de dessins ont révélé l'inflexible ballet des premiers stades du développement du ver, au cours desquels 671 cellules naissaient et 111 mouraient (ou 113, selon le sexe du ver). On pouvait y relier chaque cellule à sa cellule-mère ainsi qu'à sa

«grand-mère» via une série d'étapes invisibles. Grâce à cette cartographie et à d'autres qu'ils ont réalisées, John Sulston et ses collaborateurs ont construit le premier, et jusqu'à présent le seul, «arbre généalogique cellulaire» complet d'un organisme multicellulaire.

Si le désir de capter le développement d'un organisme avec un tel degré de détail a précédé

les recherches dans la régénération des tissus ou à lutter contre le cancer – une maladie entraînée par l'expansion incontrôlée de certaines lignées cellulaires. «Il y a un réel sentiment qu'une nouvelle ère s'ouvre», explique Alexandre Schier, un biologiste du développement à l'université Harvard, à Cambridge, dans le Massachusetts, qui utilise l'édition du génome pour retracer la généalogie cellulaire des poissons zèbres et d'autres espèces.

L'histoire d'une cellule est écrite dans son génome: chaque mutation acquise et transmise aux cellules-filles fait figure de sauvegarde. En 2005, l'informaticien Ehud Shapiro, de l'institut des sciences Weizmann à Rehovot, en Israël, a suggéré que les chercheurs utilisent les mutations naturelles des cellules humaines pour déterminer leurs liens de parenté. Il imagina un prolongement (au moins son concept) de la cartographie cellulaire de *C. elegans*, qu'il appela le *Human cell lineage project*. Mais la discipline n'était pas prête pour une telle avancée. «Quand nous avons proposé cette vision, ni le domaine de recherche ni le terme de génomique cellulaire n'existaient.»

Une décennie plus tard, les chercheurs ont développé une série d'outils puissants pour étudier la biologie de cellules individuelles, de leurs molécules d'ARN et leurs protéines jusqu'à leurs génomes, uniques et propres à chacune. Ehud Shapiro entrevoit maintenant un moyen de reconstituer le développement humain, image par image, de l'œuf fertilisé à l'adulte. «On veut le film complet en 3D, du début à la fin», clame-t-il. Pour réaliser un tel film, il n'est même pas nécessaire d'examiner le génome entier. L'équipe d'Ehud Shapiro se concentre sur des fragments répétitifs d'ADN disséminés à travers le génome, appelés microsatellites. Ces séquences ont tendance à muter plus fréquemment que le reste du génome. Son équipe travaille au séquençage de dizaine de milliers d'entre elles dans le génome de centaines de cellules humaines individuelles afin de déterminer comment elles sont reliées les unes aux autres.

UN NEURONE APPARENTE À UNE CELLULE DU CŒUR

Christopher Walsh, neuroscientifique et biologiste du développement à l'hôpital pour enfants de Boston et à la Harvard Medical School, doute que les chercheurs arrivent un jour à reconstituer une généalogie complète des cellules du corps humain comme ils l'ont fait pour *C. elegans*. Mais une cartographie incomplète serait déjà un progrès important. «J'étudie le lignage cellulaire dans le cortex depuis vingt-cinq ans et l'idée de le retracer directement dans le cerveau humain était un rêve inconcevable. Maintenant, c'est une réalité», explique-t-il.

Quand nous avons proposé cette vision, la génomique cellulaire n'existait pas

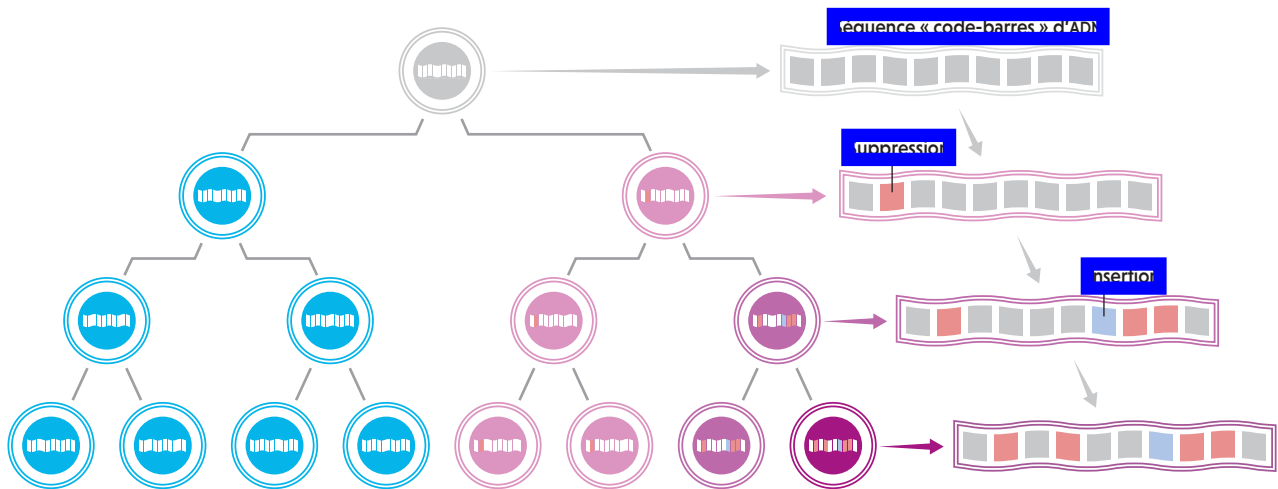
Ehud Shapiro,
de l'institut Weizmann, en Israël

es travaux de John Sulston d'au moins un siècle, il a toujours paru difficile de le faire sur un animal plus complexe. Personne ne peut suivre le destin de milliards de cellules humaines ou de souris avec simplement un microscope et un Rubik's cube pour passer le temps. Mais d'autres moyens existent aujourd'hui. Les révolutions dans l'édition et le séquençage du génome à l'échelle d'une cellule unique ont entraîné une renaissance de la cartographie des lignages cellulaires.

Ce domaine attire non seulement les biologistes du développement, mais aussi des généticiens convaincus que comprendre l'histoire d'une cellule – d'où elle vient et même ce qui lui est arrivé – est l'une des prochaines grandes étapes de la biologie. Pour le moment, les résultats ont mis en évidence des indices fascinants sur la manière dont les humains sont «construits». Par exemple, les cellules individuelles d'un organe comme le cerveau seraient plus proches de certaines cellules d'autres organes que des tissus qui les entourent. Et contrairement au développement bien balisé de *C. elegans*, celui des organismes plus complexes fait appel à un peu d'improvisation et de chance. Ce qui complique indéniablement les efforts pour en comprendre les rouages.

Mais même incomplète, la généalogie cellulaire peut-être utile. La cartographie de John Sulston a ouvert la voie à des découvertes concernant la mort cellulaire programmée ou les petites molécules d'ARN régulateurs. De nouvelles cartographies pourraient aider les chercheurs à élucider le rôle des cellules

Cet article a été publié initialement par Nature le 5 juillet 2017 sous le titre «The trickiest family tree in biology» (<https://www.nature.com/news/the-trickiest-family-tree-in-biology-1.22240>). Sa traduction et son édition ont été réalisées par Pour la science.



Les généticiens utilisent l'outil d'édition du génome CRISPR-Cas9 pour ajouter ou supprimer des fragments d'ADN dans une séquence « code-barres » du génome, sur plusieurs générations de cellules. Ensuite, en analysant les cellules une par une, ils retracent leurs liens de parenté à partir des séquences partagées dans le fragment « code-barres ».

Dans des expériences décrites en 2015, l'équipe de Christopher Walsh a séquencé les génomes complets de 36 neurones corticaux de trois individus sains décédés qui avaient donné leur cerveau à la science. La reconstruction du lien de parenté des neurones d'un même individu a révélé que des cellules étroitement liées pouvaient être dispersées dans tout le cortex, alors que des zones restreintes contenaient beaucoup de lignées distinctes. Les générations successives de cellules semblent s'aventurer loin de la zone où vivaient leurs ancêtres. Par exemple, un neurone cortical était plus étroitement lié à une cellule cardiaque du même individu qu'aux trois quarts des neurones qui l'entouraient. « Nous ne nous attendions pas à ce genre de résultat », remarque Christopher Walsh.

L'équipe de Christopher Walsh essaie actuellement de comprendre comment cette mosaïque cérébrale – où certaines cellules portent des variants différents d'un même gène – affecte la santé. Les chercheurs ont par exemple identifié des formes d'épilepsie qui surviennent même lorsqu'une petite proportion de cellules dans une infime partie du cerveau portent une mutation causant la maladie. Ils ont aussi découvert que des neurones d'un individu sain peuvent porter des mutations qui entraîneraient crises d'épilepsie et schizophrénie si elles étaient plus répandues. Ces travaux suggèrent que les conséquences varient selon la cellule où se produit une mutation. « La lignée détermine quelles maladies sont possibles », résume Christopher Walsh.

D'autres scientifiques mettent au jour, dans les génomes de cellules adultes, des vestiges d'événements qui se sont déroulés au début de la vie. Dans des expériences publiées

cette année, Michael Stratton, un généticien du Wellcome Trust Sanger Institute à Hinxton, au Royaume-Uni, et son équipe ont séquencé des génomes de globules blancs provenant de 241 femmes ayant un cancer du sein, à la recherche de mutations qui n'apparaîtraient que dans un sous-groupe de ces cellules. L'étude a révélé des mutations survenues très tôt dans le développement, peut-être même durant le stade embryonnaire à deux cellules. Les chercheurs ont aussi remarqué que les descendantes des cellules embryonnaires mutées ne contribuent pas de façon égale au système sanguin adulte. Peut-être parce qu'une cellule se multiplie plus efficacement qu'une autre ou, comme Michael Stratton le suggère, parce que, par le jeu du hasard, une cellule contribuera plus au développement d'un fœtus qu'à celui d'un placenta ou d'un autre tissu de soutien.

Selon Michael Stratton, les études futures rechercheront les goulots d'étranglement qui imitent la contribution de certaines lignées cellulaires durant le développement. « Nous commençons à entrevoir les règles du développement normal chez l'humain », note-t-il.

DES CODES-BARRES POUR SUIVRE LES MUTATIONS

Jay Shendure, un généticien de l'université de Washington à Seattle, se souvient encore du jour où l'histoire des cellules a commencé à le fasciner. À 14 ans, intéressé par la biologie et l'informatique, il avait écrit un programme pour modéliser un amas de cellules qui se multipliaient. Il voulait impressionner son oncle, un spécialiste en chirurgie reconstructive venu d'Inde en visite. « Il m'a dit : "C'est fantastique. Un jour, tu feras la même chose, mais au lieu d'un amas de cellules, il s'agira d'un bébé entier" », se remémore le scientifique.

Presque dix ans plus tard, Jay Shendure, alors en première année de thèse, travaillait pour le généticien George Church, de Harvard. George Church lui présenta une liste d'idées

«qui paraissaient toutes complètement absurdes», se souvient Jay Shendure) ; l'une d'elles était de reconstruire le lignage de plusieurs cellules à la fois, en une seule expérience. Jay Shendure s'escrima pendant six mois, manipulant l'ADN à l'aide d'enzymes, des endonucléases recombinases, afin de créer, dans les génomes de bactéries, une trace qui resterait visible lorsqu'elles se divisent. Au lieu de repenser sur des mutations naturelles, le système créerait des variants que l'on suivrait à la trace.

Jay Shendure finit par changer de projet, mais l'idée lui est revenue il y a quelques années lorsque deux étudiants, Aaron McKenna et Greg Findlay, ont rejoint son laboratoire à Seattle. Ils ont alors réalisé que l'outil d'édition du génome à la mode, CRISPR-Cas9, serait idéal pour introduire des mutations traçables dans n'importe quelle région souhaitée du génome. En travaillant avec le laboratoire du biologiste Alexander Schier, à l'université Harvard, ils ont introduit CRISPR-Cas9 dans deux embryons de poissons zèbres au stade d'une cellule après l'avoir programmé pour éditer (supprimer ou ajouter des fragments d'ADN) les séquences d'ADN repérables – des «codes-barres» qu'ils avaient insérés au préalable dans leurs génomes. Ils ont ensuite séquencé ces codes-barres dans les cellules d'un animal adulte et utilisé les mutations introduites pour reconstituer leur lignage.

DES VARIATIONS D'UN INDIVIDU À L'AUTRE

Les arbres de parenté qu'ils ont établis montrent qu'un petit nombre de lignées embryonnaires qui se forment au début du développement engendrent la majorité des cellules d'un organe donné. Plus de 98 % des cellules sanguines d'un poisson, par exemple, venaient de seulement cinq des mille lignées cellulaires que l'équipe avait retracées. Et même si ces cinq lignées contribuaient aussi à d'autres tissus, c'était en bien plus petite proportion. Elles étaient, par exemple, entièrement absentes des cellules musculaires du cœur, lequel était principalement construit à partir de son propre petit nombre de précurseurs. «Cela m'a profondément surpris», note Jay Shendure. Son collègue Alexander Schier ajoute qu'il essaye encore l'attribuer un sens aux données obtenues.

Jan Philipp Junker, un biologiste du développement spécialisé dans les approches quantitatives au centre de médecine moléculaire Max Delbrück, à Berlin, explique que les arbres généalogiques cellulaires varient probablement grandement d'un individu à l'autre et que la domination de certaines lignées observée par l'équipe de Jay Shendure et Alexander Schier pourrait être le résultat d'événements stochastiques. Les cellules d'un embryon au stade précoce se déplacent et seule une fraction

COMMENT UNE CELLULE SOUCHE CHOISIT SON DESTIN

Suivre le devenir de chaque cellule du corps est une chose

Une cellule souche et sa descendance «décident» de s'orienter vers tel état différencié en est une autre, que l'étude des cellules individuelles commence aussi à éclairer. L'équipe d'András Páldi, de l'École pratique des hautes études (Paris), du Génomique (Évry) et de l'École normale supérieure de Lyon vient en effet de montrer que l'état différencié auquel aboutit une lignée de cellules n'est pas le fruit d'une instruction déterministe que la cellule souche mère aurait reçue au cours du développement, mais le résultat d'un processus stochastique très dynamique.

Les biologistes se sont intéressés à des cellules connues pour se différencier en de nombreux types cellulaires : les cellules

souches hématopoïétiques, à la source des cellules qui assurent les différentes fonctions du sang. En culture, ils ont d'une part suivi en vidéomicroscopie l'évolution morphologique de chaque cellule issue d'une seule cellule souche en voie de différenciation. D'autre part, très régulièrement durant ce processus, ils ont analysé le profil d'expression des gènes de cellules individuelles.

Les chercheurs se sont ainsi aperçus que si des cellules s'orientaient vite vers un état différencié, d'autres, chacune à son rythme, oscillaient de manière stochastique entre divers phénotypes avant de se stabiliser : elles semblaient hésiter, changeant plusieurs fois de morphologie sur plusieurs générations. Mieux, ces hésitations étaient corrélées avec des variations dans l'expression des gènes, comme si les cellules exploraient différentes possibilités en activant ou réprimant certains gènes, jusqu'à atteindre une combinaison stable de gènes actifs et la morphologie correspondante.

Ainsi, une cellule se différencie par essais et erreurs successifs. Que l'on perçoive la différenciation comme un processus de variation-sélection analogue à l'évolution, ce qu'a proposé le biologiste Jean-Jacques Kupiec dès les années 1980, ou comme une exploration que ferait la cellule dans un espace où chaque point correspondrait à un profil d'expression de ses gènes, une chose est sûre : le hasard joue un rôle clé dans le tracé de l'arbre généalogique des cellules.

MARIE-NEIGE CORDONNIER

A. Moussy et al., *Plos Biol.*, 17 juillet 17.

contribue à l'organisme final. Pour lui, il serait plus révélateur de suivre des événements plus tardifs du développement, comme la formation des trois feuilletts germinatifs qui engendrent les organes, car ces événements sont moins gouvernés par le hasard.

Jan Philipp Junker et d'autres chercheurs ont développé pléthore d'autres techniques fondées sur CRISPR pour reconstituer des histoires liées au développement. Avec Alexander van Oudenaarden, biologiste des systèmes à l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, il a utilisé une telle approche pour suivre la régénération d'une nageoire blessée chez un poisson zèbre. Ils ont alors découvert que la régénération se déroulait selon un processus similaire à celui du développement : peu des lignées de cellules qui avaient donné naissance à la nageoire originale étaient perdues quand elle se recréait à partir de cellules souches. Cette découverte confirmait des études précédentes, mais cette fois, les méthodes fondées sur CRISPR ont permis à l'équipe de retracer le lignage de milliers de cellules en une seule expérience.

George Church explique que son équipe a utilisé CRISPR pour étudier le développement de souris et a réussi à suivre la division des cellules embryonnaires qui engendrent les trois feuillets germinatifs à partir desquels se forment tous les organes du corps. «Je ne pense pas que nous soyons si loin d'établir un lignage complet», dit-il.

Certains chercheurs aspirent à comprendre non seulement comment les cellules d'un organisme sont apparentées les unes aux autres, mais aussi ce qui leur arrive durant le développement. Michael Elowitz et Long Cai, tous deux de l'Institut de technologie de Pasadena, ont développé un traceur de lignée qui crée une sonde fluorescente les aidant à suivre l'histoire de cellules au cours de leur développement. Leur méthode permet de retracer si, dans une lignée donnée, certains gènes du développement ont été activés par le passé. Le 5 juillet, Michael Elowitz, Jay Shendure et Alexander Schier ont reçu une subvention de 10 millions de dollars pour quatre ans de la part du Paul G. Allen Frontiers Group pour combiner leurs technologies. Le trio prévoit de développer des

Je ne pense pas que nous soyons si loin d'établir un lignage complet

George Church, généticien à l'université Harvard

chromosomes de synthèse agissant comme des enregistreurs de l'histoire des lignées cellulaires et des événements moléculaires.

De tels enregistrements pourraient permettre aux scientifiques d'agir sur le développement d'une cellule de manière plus fine qu'avec les techniques actuelles de reprogrammation cellulaire, selon Tim Liu, biologiste de synthèse à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), à Cambridge, qui travaille lui aussi sur une technique pour enregistrer l'histoire d'une cellule. «Dans le futur, on

Toutes les archives



Pour la Science
Dossier

Pour la Science

1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr

Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

➤ pourrait voir certaines versions de ces enregistreurs incorporées dans les thérapies cellulaires», bien que ce ne soit pas pour tout de suite, admet-il. «Je ne vais pas injecter mon enregistreur CRISPR à un patient.»

La lutte contre le cancer est le domaine où les nouvelles méthodes pour établir les lignages cellulaires vont probablement d'abord faire leurs preuves. «Le cancer est une maladie de lignées – une maladie de cellules souches», explique Christopher Walsh. Des chercheurs se sont ainsi attelés à la recherche de l'origine des cellules métastatiques qui émergent de la tumeur primaire et envahissent parfois des organes distants. Elles semblent être les cellules cancéreuses les plus difficiles à vaincre et les plus susceptibles de tuer les patients.

Une équipe dirigée par Nick Navin, généticien au centre du cancer MD Anderson de l'université du Texas, à Houston, a publié en mai dernier une généalogie des cellules de deux cancers du côlon. Les résultats ont montré que les cellules métastatiques ayant envahi le foie partageaient un grand nombre de mutations avec les tumeurs primaires dont elles provenaient. Ce qui suggère que les métastases ont émergé à un stade tardif de la tumeur et qu'elles n'ont pas eu besoin de beaucoup de nouvelles mutations pour se répandre.

SUIVRE CHAQUE LIGNEE TOUT AU LONG DE LA VIE

L'étude des lignages pourrait aussi montrer si les tumeurs se développent à partir d'une seule cellule, comme l'ont avancé des généticiens, ou si, au contraire, elles proviennent de plusieurs cellules, comme le suggèrent des études d'imagerie. Nick Navin pense que des approches similaires pourraient être utilisées pour orienter le traitement. Son équipe, ainsi que d'autres chercheurs, suivent des lignées de cellules cancéreuses chez des patients depuis le début de leur traitement. Ils espèrent que ces études mettront en lumière des lignées résistantes, ce qui aiderait les médecins à choisir des traitements plus adaptés et à les modifier au cours de la thérapie.

Cependant, à l'heure actuelle, dans ce domaine, les promesses devancent de beaucoup la réalité. Et le lignage cellulaire de *C. elegans* effectué par John Sulston domine toujours les tentatives actuelles. Stephen Quake, un bio-ingénieur de l'université Stanford, en Californie, a développé sa propre méthode fondée sur CRISPR pour suivre la généalogie des cellules et, comme John Sulston, il a décidé de la tester sur le petit ver. «C'est intéressant d'avoir une référence», explique-t-il. Avec son équipe, il a séquencé les génomes des cellules d'un animal adulte après avoir introduit des mutations à l'aide de CRISPR durant son développement. L'étude a duré bien moins

longtemps que l'année et demie nécessaire à John Sulston avec son microscope. Mais Stephen Quake note que le résultat obtenu était aussi moins complet. Certes, l'expérience a capté une transition clé dans le développement du ver – à savoir la séparation des cellules destinées à former l'intestin de celles concernant le reste de l'organisme –, mais il manque les

Nous ne savons pas combien de voies différentes il existe pour construire un cœur

Alexander Schier, biologiste du développement
à l'université Harvard

détails d'une grande finesse que John Sulston a observés de ses yeux. «Je vais être totalement franc, je ne suis pas très impressionné par mes résultats», explique Stephen Quake, qui n'a même pas prévu de publier son travail devant la prolifération des publications utilisant la même technique. «Personne n'a encore vraiment réussi pour l'instant», précise-t-il.

John Sulston aurait-il mis la barre trop haut avec *C. elegans*? Selon Jan Philipp Junker, «le concept de généalogie cellulaire est très influencé par le travail de Sulston». Et mériterait d'être repensé.

Chez les poissons, les souris et les humains, chaque généalogie cellulaire est unique et évolue au cours de la vie de l'individu, au fur et à mesure que les tissus se réparent et se régénèrent. Jan Philipp Junker et d'autres espèrent que les nouvelles techniques vont permettre aux biologistes de s'intéresser à la variabilité dans ces arbres généalogiques – entre les individus, entre leurs organes et dans le temps. Comme Alexander Schier le souligne: «Nous ne savons pas combien de voies différentes il existe pour construire un cœur.»

Pour Michael Elowitz, ce vaste inconnu pourrait rendre ce genre de travaux révolutionnaires. «Cela changera le genre de questions que l'on se posera.» La cartographie de John Sulston a guidé les biologistes sur un territoire inconnu et ces nouvelles techniques pourraient faire de même. «On ne peut pas vous dire ce que l'on va trouver, mais le sentiment général est que nous allons découvrir de nouveaux continents à explorer.» ■

BIBLIOGRAPHIE

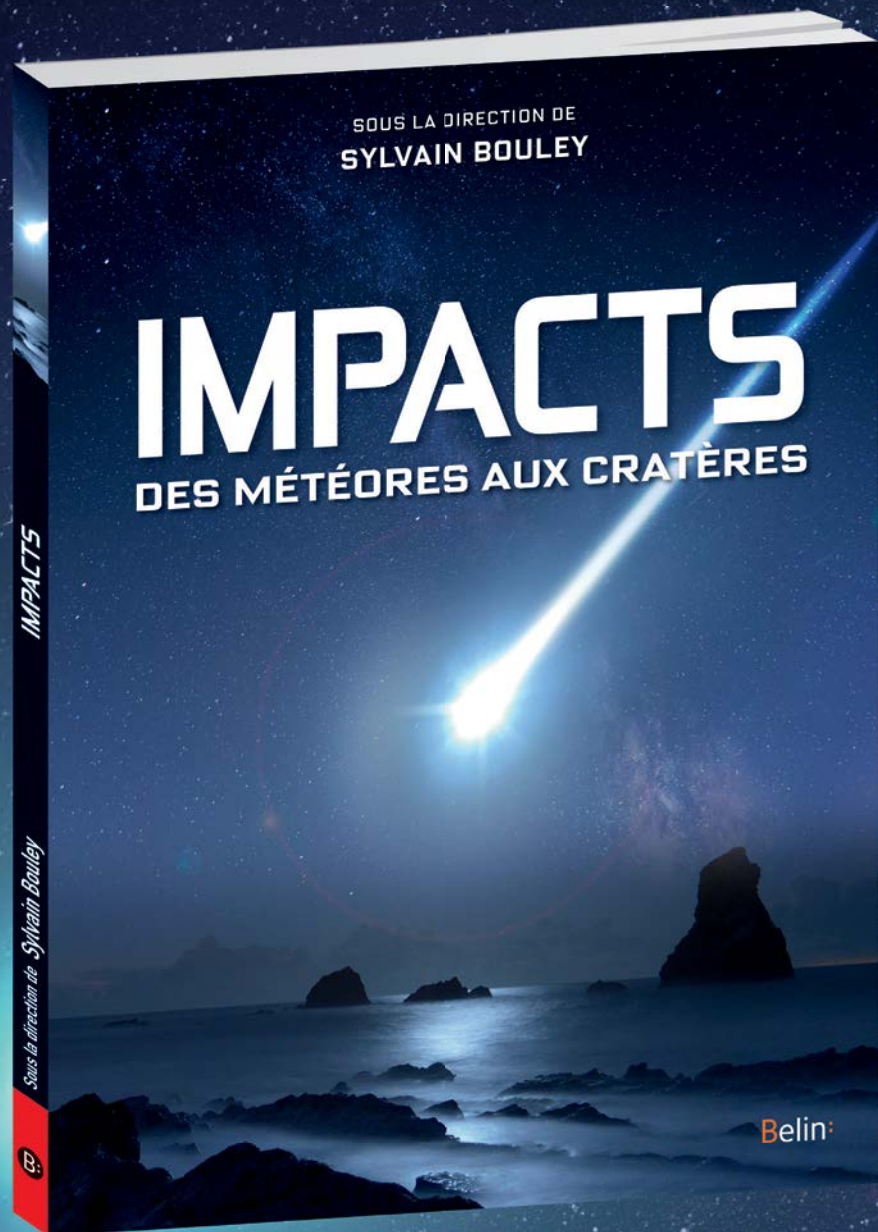
J. E. Sulston et al., **The embryonic cell lineage of the nematode *Caenorhabditis elegans***, *Dev. Biol.*, vol. 100, pp. 64-119, 1983.

D. Frumkin et al., **Genomic variability within an organism exposes its cell lineage tree**, *Plos Comput. Biol.*, vol. 1, e50, 2005.

J. P. Junker et al., **Massively parallel clonal analysis using CRISPR/Cas9 induced genetic scars**, *Biorxiv*, 4 janvier 2017.

R. Kalhor et al., **Rapidly evolving homing CRISPR barcodes**, *Nature Methods*, vol. 14, pp. 195-200, 2017.

Le premier récit complet des
rencontres, parfois catastrophiques,
qui se produisent entre
les astéroïdes et les planètes !



La durée d'une vie humaine s'est
élevée suffisamment pour sélectionner
chez le renard sauvage
les caractères qui font de lui
un animal de compagnie.

L'ESSENTIEL

• Les humains ont domestiqué le loup et produit le chien au cours des dernières dizaines de milliers d'années, mais on ignore comment exactement.

• Des chercheurs russes ont tenté de reproduire en accéléré une domestication analogue à celle du loup, en procédant sur des renards à une sélection fondée sur la docilité.

• En quelques générations, ils ont obtenu des renards amicaux et dociles, dotés aussi de certains traits physiques associés à la domestication.

• Après plusieurs dizaines de générations, ces caractéristiques se sont accentuées. L'expérience se poursuit.

LES AUTEURS



LYUDMILA TRUT
Professeure à l'Institut de cytologie et de génétique de Novossibirsk (Fédération de Russie)



LEE ALAN DUGATKIN
Éthologue et historien des sciences à l'université de Louisville, aux États-Unis

Comment transformer un renard en chien

DES RENARDS AU MUSEAU ARRONDI, DOTES D'UNE QUEUE TOUFFUE QU'ILS REMUENT DE PLAISIR À LA VUE DES HUMAINS... CES DRÔLES DE CANIDÉS AFFECTUEUX SONT LE FRUIT D'UNE EXPÉRIENCE ORIGINALE MENÉE DEPUIS PRÈS DE 60 ANS EN SIBÉRIE POUR MIEUX COMPRENDRE LA DOMESTICATION.

L Il court vers moi, en remuant sa queue. Ses yeux affectueux sont pleins de joie. Il saute dans mes bras et se frotte contre mon visage. Comme un chien le ferait, sauf qu'il s'agit d'un renard argenté de Sibérie. Cet individu et ses proches parents sont le fruit des 58 générations qui se sont succédé dans le cadre d'une expérience d'élevage sélectif, réalisée afin de tenter de découvrir les secrets de la domestication et de comprendre comment les humains ont pu transformer des loups en les premiers chiens.

J'ai 83 ans aujourd'hui. Quand je repense à cette expérience à laquelle j'ai consacré les trois quarts de ma vie, mes pensées vagabondent parfois jusqu'à cet avertissement

donné par le renard au petit prince dans le grand classique d'Antoine de Saint-Exupéry: «Tu deviens responsable pour toujours de ce que tu as apprivoisé».

Je suis donc devenue responsable de ces renards peu de temps après ma première rencontre en 1958 avec mon mentor et ami Dmitri Beliaïev (disparu en 1985). Je terminais mes études à l'université d'État de Moscou quand j'entendis dire que Beliaïev s'apprêtait à rejoindre l'Institut de cytologie et génétique nouvellement fondé à Novossibirsk et qu'il recherchait des étudiants pour participer à une expérience sur la domestication qu'il était sur le point de lancer.

Dès ma première rencontre avec Beliaïev, je fus frappée par le fait qu'il me traitait en égale, moi qui n'étais qu'une étudiante. Il m'expliqua l'idée essentielle de la recherche, qui consistait à étudier le processus de la domestication en «accélééré»: «Je veux produire un chien à partir d'un renard», déclara-t-il. Génération après génération, nous allions élever et sélectionner les renards qui interagissaient le plus positivement avec les humains. Si ce processus fonctionnait comme nous pensions qu'il le ferait, la domestication de ces renards – peut-être apparentée au processus qui a transformé des loups en chiens – dévoilerait ses rouages devant nos yeux.

Au moment de quitter le bureau de Beliaïev, je désirais déjà être de l'aventure, ce qui impliquait de partir pour Novossibirsk, la plus grande ville de Sibérie. J'étais enthousiasmée par l'idée de faire partie de la première génération de chercheurs peuplant Akademgorodok (littéralement la «petite ville académique»), la cité des sciences nouvellement fondée dans cette ville, et de collaborer avec un homme dont je sentais qu'il s'agissait d'un penseur révolutionnaire. Et c'est ainsi que, peu après, mon mari, notre fille en bas âge et moi prîmes le train pour un long voyage vers l'est depuis Moscou.

L'hypothèse de Beliaïev relative au processus de la domestication animale était à la fois simple et radicale. Ce chercheur en était venu à penser que la caractéristique définissant l'animal domestiqué était sa docilité. Donc, sur le plan évolutif, la domestication a dû être réalisée par nos ancêtres pour l'essentiel en choisissant les animaux les moins agressifs et les moins craintifs vis-à-vis des humains. La docilité était la clé d'un élevage visant à obtenir les autres caractéristiques recherchées. Que l'on ait recherché du lait, de la viande, de la protection, de la compagnie ou tout autre trait ou bien, il a fallu que nos chiens, vaches, chevaux, chèvres, moutons, cochons et chats soient avant tout dociles.

Beliaïev pensait en outre que la plupart, sinon tous les autres traits que présentent de nombreux animaux domestiques, étaient des



sous-produits de la sélection progressive des animaux les plus dociles. Aujourd'hui, nous désignons l'ensemble de ces caractéristiques – une queue frisée, des oreilles pendantes, un pelage marbré, la conservation à l'âge adulte de traits juvéniles (rondeur, museau émoussé), une moindre dépendance vis-à-vis de la reproduction saisonnière stricte – par l'expression «syndrome de domestication».

Et c'est ainsi que, sous la direction de Beliaïev, j'ai élevé des renards et sélectionné les plus dociles d'entre eux

Et c'est ainsi que, sous la direction de Beliaïev, mais aussi avec une certaine part d'autonomie s'agissant des problèmes expérimentaux quotidiens, j'ai élevé des renards, initialement recueillis dans des élevages d'animaux à fourrure de toute l'Union soviétique, et sélectionné les plus dociles d'entre eux.

Chaque année, je faisais passer des tests initiaux à des centaines de renards en



À l'établissement de recherche sibérien, renards et chercheurs prennent la pose (photographies 1 et 2). Lyudmila Trut (photographie 3) caresse Penka, un renardeau né en 1974 de Pushinka, à l'époque où la chercheuse Pushinka et sa portée vivaient dans la même maison.

appliquant le protocole normalisé que nous avons mis au point. Protégée par des gants de cinq centimètres d'épaisseur, je m'approchais de chaque renard, me plaçais debout face à sa cage fermée, en ouvrais la porte et introduisais un bâton à l'intérieur. Puis j'attribuais une note aux réactions du renard sur une échelle où les individus les plus calmes obtenaient les scores les plus élevés.

LA SÉLECTION DE L'« ÉLITE » RENARDIÈRE

Les premières années, la grande majorité de ces renards ressemblaient davantage à des dragons cracheurs de feu qu'à des chiens: ils devenaient extrêmement agressifs lorsque je m'approchais ou plaçais le bâton dans la cage. Ces «renards à faible score» auraient aimé m'arracher la main, j'en suis sûre. D'autres renards avaient un score faible parce qu'ils se tapissaient au fond de leur cage tellement ils avaient peur. Mais un petit nombre d'animaux restaient calmes durant le test, en observant ce qui se passait sans réagir d'une façon ou de l'autre. Ce sont ces animaux que nous sélectionnions afin qu'ils se reproduisent et donnent naissance à la génération suivante. À chaque génération, je notais tous les détails du développement de chaque individu, depuis le stade de nouveau-né jusqu'à celui d'adulte. Nous prenions particulièrement soin d'éviter la consanguinité, car ses effets génétiques négatifs auraient pu fausser les résultats de notre expérience.

Même les renards calmes des quelques générations initiales n'étaient pas

particulièrement «sociables» envers les gens – dont ils semblaient tolérer, mais pas apprécier, la présence. Toutefois, un indice prometteur m'indiquait déjà de ce qui allait advenir à la quatrième puis à la cinquième génération: certains renardeaux, à peine capables de marcher, remuaient leur petite queue lorsque je m'approchais d'eux. Puis vint la génération six.

Comme nous l'avons écrit en 2009 dans la revue *Bioessays*, «à la sixième génération, sont apparus des renardeaux qui recherchaient avec empressement le contact humain, en remuant la queue, en gémissant, en poussant de petits cris plaintifs et en léchant à la façon d'un chien». L'apparition de cet ensemble de traits comportementaux était si frappante que nous avons qualifié ces animaux d'«élite». Ces petits renards levaient même les yeux quand ils entendaient leur nom. Comme nous l'avons écrit dans notre contribution à la seconde édition d'un livre sur la génétique du chien en 2012 (*The Genetics of the Dog*, CABI Publishing), tout indiquait qu'ils désiraient très vivement la compagnie de l'homme. En outre, ces renardeaux apprivoisés réagissaient à des stimuli sonores deux jours plus tôt et ouvraient les yeux un jour plus tôt que leurs congénères non apprivoisés, comme s'ils se préparaient à interagir avec les gens le plus tôt possible.

Tous les humains, même les plus endurcis, qui rencontraient des renards d'«élite» tombaient sous leur charme. Un soir, après le départ des membres de l'équipe, Beliaïev fit entrer dans notre établissement de recherche un certain général Lukov. Ce célèbre officier de l'armée soviétique était un homme austère et endurci par les horreurs de la guerre. Toutefois, quand j'ouvris la cage de l'une des

elles d'«élite» et que celle-ci se mit à gambader avant de venir se coucher près de moi, l'attitude digne du général disparut complètement. Apparemment étonné, il s'approcha de la renarde, s'accroupit et se mit à lui caresser longuement la tête.

Au sein de cette sixième génération, les membres de l'élite ne constituaient que 2 % des renards élevés, mais leur nombre augmenta ensuite à chaque génération, de sorte qu'ils représentent aujourd'hui 70 % de l'effectif.

LES EMBRYONS TRANSPLANTÉS MONTRENT L'IMPLICATION DE LA GÉNÉTIQUE

Beliaïev et moi étions des généticiens de formation. Or toute expérience sur la domestication est aussi une étude de génétique évolutive. En particulier, nous voulions être certains que les changements observés chez les renards domestiqués étaient bien d'origine génétique. Nous avons donc mis au point un protocole impliquant des renards dociles et des renards issus d'un autre groupe constitué au cours de notre expérience: des animaux sélectionnés parce qu'ils se montraient agressifs envers les humains. Des générations de sélection au sein de ce groupe avaient en effet conduit à ce que nous pourrions décrire comme un équivalent, chez les renards, du Cerbere, ce chien à plusieurs têtes qui garde la porte des enfers dans la mythologie grecque. Ces renards-là étaient méchants, aucun doute là-dessus.

Notre idée était de transplanter des embryons provenant de mères dociles dans l'utérus de mères agressives, et vice-versa. Si les renardeaux nouveau-nés se comportaient comme leur mère biologique, et non comme leur mère porteuse, nous pourrions être sûrs que la docilité et l'agressivité sont des caractères fondamentalement génétiques.

Chaque transplantation impliquait deux femelles en gestation depuis une semaine environ, l'une docile et l'autre aggressive. Après les avoir anesthésiées, je faisais une incision chirurgicale dans l'abdomen de l'une d'elles et localisais l'utérus et ses trompes droite et gauche contenant chacune des embryons implantés. J'enlevais alors les embryons d'une trompe de la femelle donneuse et les plaçais ensuite dans la procédure, retirant les embryons de l'une des trompes de la femelle receveuse, mais cette fois en remplaçant ceux-ci par les embryons provenant de la femelle donneuse. Dans certaines de ces transplantations, la donneuse était une femelle docile et la receveuse une femelle aggressive. Les rôles étaient inversés dans d'autres transplantations.

Toutefois, sept semaines plus tard, après la naissance des renardeaux, nous devions déterminer quels membres de la portée



descendaient biologiquement de la mère et lesquels avaient été transplantés. Les renards eux-mêmes m'aiderent à résoudre ce problème: chez ces animaux, la couleur du pelage est en effet une caractéristique génétique, de sorte qu'elle pouvait servir de marqueur de leur lignée. Il suffisait de la définir assez bien.

Avec mon amie et collègue de longue date Tamara Kuzhutova, nous notions scrupuleusement le comportement adopté par les renardeaux dès leurs premières interactions avec les humains. Je me souviens en particulier d'une femelle aggressive et de ses petits, certains agressifs et d'autres pas. Même s'ils marchaient à peine, les renardeaux dociles se précipitaient vers la porte de la cage en remuant la queue dès qu'un humain se trouvait à proximité. Ce comportement inapproprié semblait agacer la mère, qui grognait, les saisissait par le cou et les lançait vers l'arrière de la «tanière» aménagée dans la cage.

Quant aux descendants biologiques de la mère aggressive, ils répondaient aux attentes de celle-ci: ils grognaient de façon aggressive et couraient d'eux-mêmes vers le fond de la cage. Nous avons observé ce comportement à maintes reprises: les renardeaux se comportaient comme leur mère biologique, et non comme leur mère porteuse. La docilité et l'agressivité envers les humains étaient donc bien des traits génétiques.

En 1974, nous en étions à 15 générations expérimentales. Comme Beliaïev l'avait prédit,

Le renardeau domestique apprécie le contact avec l'homme. Son museau arrondi et son pelage tacheté diffèrent de ceux de ses ancêtres.

beaucoup des renards apprivoisés rejoignaient les renards d'«élite» et présentaient aussi plusieurs des traits associés au syndrome de domestication. Comme dans les autres espèces domestiquées, leur tête avait un aspect plus juvénile, leur queue était plus touffue, le niveau de leurs hormones de stress était plus bas et leur cycle de reproduction plus long. Quelques-uns, dont l'un de mes préférés appelé Mechta – ce nom signifie «rêve» –, avaient même des oreilles pendantes.

VIVRE AVEC UNE RENARDE ET SES SIX PETITS

Les animaux de la plupart des espèces domestiquées ne nouent pas de relations étroites avec des personnes précises, mais c'est différent chez les chiens. Cette affinité émotionnelle pour certains humains pouvait-elle apparaître vite, à l'instar des évolutions si nombreuses que nous avons observées chez les renards? Et vivre avec un humain serait-il aussi possible chez les renards que nous avons domestiqués? Pour répondre à ces questions, je proposai à Beliaïev d'utiliser nos renards «génétiquement dociles» afin d'étudier les liens émotionnels profonds comparables à ceux qui se créent entre l'homme et le chien.

La ferme expérimentale où nous menions notre expérience avait une petite maison. J'ai proposé à Beliaïev de m'y installer avec l'un des renards d'«élite» afin de voir quels liens se développeraient entre nous. Il accepta avec enthousiasme, et c'est ainsi que, le 28 mars 1974, une renarde du nom de Pushinka – «petite boule de poils» en russe – et moi emménâmes ensemble.

Pushinka avait des yeux couleur charbon, un pelage noir aux extrémités argentées et une bande blanche sur la joue gauche. Âgée tout juste de un an, elle n'était qu'à une ou deux semaines de mettre bas. J'allais donc observer à la fois comment elle s'habituerait à la vie avec moi, mais aussi si ses petits nés au contact d'humains s'adaptent à la vie en société différemment des autres renardeaux, même ceux faisant partie de l'«élite».

Notre nouveau domicile comportait trois pièces ainsi qu'une cuisine et une salle de bains. Je me réservai une pièce comme chambre à coucher et bureau et j'installai une manière pour Pushinka dans une autre pièce. Équipée de quelques chaises et d'une table, la troisième pièce fit office de salle commune. Pushinka était libre de courir partout dans la maison. Afin que je puisse consacrer aussi du temps à ma famille humaine, Tamara Kuzhutova et d'autres collègues prenaient la relève certains jours et certaines nuits. Chacun prenait des notes détaillées tout au long de la journée et de la soirée sur tous les aspects du comportement de Pushinka.

UN RENARD N'EST PAS UN LOUP

Les expérimentations rapportées par Lyudmila Trut et ses collègues sont

réduisantes et apparemment concluantes. Elles confirment que la docilité et l'agressivité ne sont pas seulement des comportements acquis, mais qu'elles possèdent une forte base héréditaire et innée. Ainsi, il suffit de quelques générations pour sélectionner des souches de canidés plus pacifiques, plus prolifiques, plus grands ou plus sombres. Cela correspond d'ailleurs à ce que pratiquent les éleveurs depuis des siècles.

Parviendra-t-on pour autant à domestiquer des renards et à les transformer en chiens à part entière, de la même façon que les humains ont domestiqué les loups? Ce n'est pas du tout acquis, car le loup et le renard diffèrent en un point essentiel : le renard est une espèce individualiste.

Alors que le loup est une espèce éminemment sociale.

L'objectif de Dmitri Beliaïev était, comme il l'a écrit, d'obtenir entre le renard et l'homme la même complicité que nos ancêtres avaient fini par obtenir avec le loup/chien. Après 58 ans d'élevage sélectif, cet objectif n'est toujours pas atteint, bien que, selon les auteurs de l'article, les résultats soient très positifs et en progrès. Beliaïev, qui était un généticien, ne se préoccupait pas des différences sociales entre loup et renard. Or ces différences ont de l'importance. S'il est possible de sélectionner des individus dociles chez les deux espèces, la domestication a des conséquences morphologiques voisines (queue, oreilles, pelage), on ne pourra probablement pas obtenir la même complicité avec l'homme que celle obtenue avec le loup/chien. En effet, le renard n'a pas, dans son patrimoine génétique, l'aptitude à vivre en meute. Le renard ne pratique pas la solidarité étroite entre membres du groupe pendant la chasse et l'élevage des jeunes, ce qui est l'originalité du loup et qui a été la clé de sa domestication par nos ancêtres chasseurs-cueilleurs (voir « La domestication du loup », *Pour la Science*, janvier 2013). Si nos ancêtres ont choisi le loup et non le renard ou un autre canidé, ce n'est pas un hasard.

PIERRE JOUVENTIN
éthologue émérite au CNRS

Les premiers jours furent comme un tour sur des montagnes russes. Le jour de l'emménagement, Pushinka parcourut la maison en courant, visiblement agitée. Elle ne voulut rien manger jusqu'à ce que je lui donne un petit morceau de fromage et une pomme que je m'étais préparés. Le deuxième jour, les choses s'améliorèrent. Quand je retournai à la maison, après une petite sortie, Pushinka vint à ma rencontre à la porte – comme l'aurait fait un chien. Mais ses sautes d'humeur continuèrent. Elle pouvait être si nerveuse qu'il me semblait que ma nouvelle amie était sur le point de craquer nerveusement, mais le lendemain, elle sautait tranquillement sur le lit et venait s'enrouler à mes côtés.

L'adaptation fut plus difficile que je ne le prévoyais, mais au bout d'une semaine environ, Pushinka s'assagit. Lorsque je travaillais à mon bureau, elle se couchait à mes pieds. Elle semblait apprécier les sorties en

bromenade avec moi. Dans l'un des jeux qu'elle préférait, je cachais une friandise dans ma poche, qu'elle devait essayer d'attraper. Elle s'allongeait parfois sur le dos, pour m'inviter à caresser son ventre exposé.

Le 6 avril, Pushinka donna naissance à six petits. Et à mon grand étonnement, elle m'en ramena un, le déposant à mes pieds. Je me souviens lui avoir dit: «Tu devrais avoir honte! Ton petit va prendre froid!» Toutefois, après que je l'eus rapporté à la tanière, Pushinka me le ramena. Nous fîmes ainsi quelques allers et retours, puis j'ai baissé les bras et renoncé à remettre le renardeau dans la tanière.

LA RENARDE S'EST MISE À ABOYER CONTRE UN INTRUS

Je donnai des noms à ces six renardeaux, tous commençant par P en l'honneur de la maman: Prelest («magnifique»), Pesnya («chant»), Plaksa («pleurnicheur»), Palma («palmier»), Penka («peau») et Pushok (la version masculine de «petite boule de poils»). Au bout de quelques semaines, tous accouraient quand j'entrais dans la pièce où était installée la tanière.

Chacun des renardeaux avait son caractère: Pushok attirait toute l'attention sur lui; Palma aimait sauter sur les tables; Pesnya était stoïque; Prelest persécutait parfois ses frères et ses sœurs; Plaksa émettait des sons de marmonnement en faisant le tour d'une pièce, et Penka, ma préférée, était une véritable championne de la sieste.

En dépit de l'assertion de Léon Tolstoï selon laquelle «toutes les familles heureuses se ressemblent», Pushinka et ses petits formaient une famille à la fois heureuse et unique. Je jouais au ballon avec eux tous, ou courais partout pour être pourchassée par les petits. Penka était particulièrement friande de cette dernière activité, et sautait sur mon dos chaque fois qu'elle me rattrapait. Les sorties particulièrement exubérantes épuisaient les renardeaux. L'une de mes notes de mon journal les décrit ainsi: «endormis, insouciant et sans peur».

A mesure que sa progéniture grandissait et qu'elle pouvait passer moins de temps à la surveillance, le lien entre Pushinka et moi se renforçait. Elle s'allongeait à mes pieds et attendait que je lui gratte la nuque. Si je sortais de la maison pour un moment, elle se postait parfois à la fenêtre, pour attendre mon retour. Quand elle me voyait approcher de la maison, elle allait se poster à la porte, en remuant la queue.

En dépit de tous ces signes de notre relation privilégiée, rien ne pouvait me préparer aux événements du 15 juillet 1974 au soir. Comme je le faisais souvent, je m'étais assise sur le banc placé à l'extérieur de la maison pour lire un livre et Pushinka était couchée à

mes pieds. J'entendis des pas au loin, mais sans y prêter attention. Pushinka, elle, sentit un danger. Au lieu de se cacher ou de rechercher ma protection, elle s'élança à toute vitesse vers l'intrus (perçu comme tel du moins) et fit quelque chose que je ne l'avais jamais vu faire auparavant et que je ne la reverrai plus jamais faire: elle aboya exactement comme l'aurait fait un chien de garde.

Pushinka et ses petits formaient une famille à la fois heureuse et unique

Jamais auparavant Pushinka n'avait agi de manière vraiment agressive et encore moins féroce à l'égard d'un humain. Je m'approchai en courant et découvris qu'il s'agissait juste du gardien de nuit en train de faire sa ronde. Je me mis à lui parler d'une voix calme et, sentant apparemment que tout allait bien, Pushinka cessa d'aboyer.

Trois mois et demi plus tôt, nous avions emménagé dans cette maison afin de savoir si une vie commune entre un humain et un renard d'«élite», issu de 15 années de sélection, pourrait induire la même loyauté qu'entre un chien et son maître. Je considère que cette nuit a apporté une réponse décisive à cette question.

DES TRACES DE DOMESTICATION SUR LE CHROMOSOME 12

Pushinka est morte depuis longtemps. Mais notre expérience ainsi que mon implication se poursuivent. Quarante-trois générations ont suivi celle de Pushinka (43 générations humaines en arrière nous ramèneraient au Haut Moyen Âge). Les descendants de Pushinka et les autres renards sélectionnés nous ont livré de nombreuses informations sur le processus de domestication, que nous avons évoquées en détail dans notre livre paru cette année (voir la bibliographie). Il suffit de dire que nos renards domestiqués d'aujourd'hui sont encore plus amicaux et affectueux avec les humains. Ils suivent les regards et les gestes de l'homme et, étrangement, ressemblent de plus en plus à des chiens – des museaux plus arrondis et des

BIBLIOGRAPHIE

L. A. Dugatkin et L. Trut, *How to Tame a Fox and Build a Dog* : Visionary Scientists and a Siberian Tale of Jump-Started Evolution, University of Chicago Press, 2017.

P. Jouventin, *La domestication du loup*, Pour la Science n° 423, janvier 2013.

L. Trut et al., *Animal evolution during domestication : The domesticated fox as a model*, Bioessays, vol. 31(3), pp. 349-360, 2009.

membres plus courts et plus gros se sont ajoutés à leurs autres caractéristiques.

Etant donné les progrès de la génétique, notre équipe a pu, ces dernières années, étudier le processus de la domestication dans l'ADN. De nombreuses régions chromosomiques associées aux caractéristiques comportementales et morphologiques uniques des renards apprivoisés (mais certainement pas toutes) ont été cartographiées sur le chromosome 12 du renard. Nous avons en particulier découvert sur ce chromosome un grand nombre de locus de caractères quantitatifs (QTL pour *quantitative trait loci* en anglais) associés au comportement docile, c'est-à-dire des régions du chromosome où se trouvent des gènes associés à des caractères variant de façon continue au sein de la population de renards et liés à la docilité (pour donner un exemple, chez l'homme, la taille ou encore la couleur de la peau sont des caractères associés à des QTL).

En comparant ces séquences d'ADN avec ce que l'on connaissait de la génétique de la domestication chez les chiens, Anna Kukekova, moi-même et nos collègues avons pu confirmer

que dans de nombreux cas, les QTL du chromosome 12 du renard mis en jeu dans sa domestication sont comparables à ceux qu'a mobilisés la domestication du loup, transformé en chien. Nous en concluons que notre élevage sélectif, poursuivi sur des dizaines de générations, a approximativement «rejoué» la transformation génétique d'un canidé sauvage en un animal de compagnie.

DES VOCALISATIONS QUI RESSEMBLENT À DES RIRES

Nos renards commencent même, presque au sens littéral du terme, à nous parler. Svetlana Gogoleva, de l'université de Moscou, et moi avons analysé les vocalisations des renards domestiqués, puis nous les avons comparées à celles des renards agressifs. Nous avons alors découvert que les sons émis par les renards apprivoisés sont singuliers: leur dynamique sonore se révèle très similaire à celle d'un rire humain. Nous ignorons comment ou pourquoi les renards domestiqués «rient», mais il est difficile d'imaginer façon plus plaisante pour une espèce de se lier à une autre. ■

LES { Partagez les savoirs } RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur nnhn.fr, rubrique : Les rendez-vous du Muséum

METIERS DU MUSÉUM

Dimanche 24 septembre - 15h : Dessinateur scientifique. *Pascal Le Roel*

CONFÉRENCES — DÉBATS

Lundi 25 septembre - 18h : L'histoire naturelle et le roman initiatique. Après des chercheurs du Muséum, l'écrivain Patrice Pluyette s'immerge avec un regard neuf dans l'exploration de la biodiversité à travers les océans et les continents. Avec *Patrice Pluyette*, en résidence d'écrivain au Muséum en 2017 et *Guillaume Lecointre*, enseignant-chercheur, zoologiste, systématicien, professeur au Muséum.

FILMS

Samedi 30 septembre - 15h : Animal pensivité. Réalisé par *Christine Baudillon* et écrit par *Jean-Christophe Bailly* - France - 2017 - 87 min.

Cycle Pousse-Pousse (pour les enfants à partir de 5 ans)
Samedi 16 septembre - 16h : Le criquet. Réalisé par *Zdenek Miler* - République tchèque - 1978 - 40 min. Découvrez la vie mouvementée du petit criquet qui, muni de son violon, croise la route de nombreux animaux de la forêt.

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

POUR LA SCIENCE



Jacques Labillardiere (ci-contre) rapporta quelque 4000 plantes de Nouvelle-Hollande, parmi lesquelles cette pâquerette locale, dont il ne reste aujourd'hui que la version numérisée. Elle seule, cette planche témoigne de ses aventures novumentées...



TYPE

Leucanophora stipitata
 Typus? (Labill.) Druce
 Determinavit: A. L. Cabrera 1961

Herbier Muséum Paris



P00742956

HERB. MUS. PARIS.

Leucanophora stipitata Labillardiere

NOUVELLE HOLLANDE - Labillardiere.
 Donné par M. WERB.

ESSENTIEL

En mars 2017, la douane australienne a brûlé par erreur des spécimens d'un herbier constitué lors de l'expédition d'Entrecasteaux autour de la Nouvelle-Hollande, entre 1792 et 1793.

Ces plantes avaient pourtant survécu à nombre de mésaventures liées au contexte politique et scientifique.

C'est à son retour, chargée de près de 10 caisses de plantes, graines et objets ethnographiques, que l'expédition a rencontré les premières difficultés.

Si un certain nombre de ces spécimens ont finalement rejoint le Muséum national d'histoire naturelle, beaucoup d'autres ont disparu, mais pourraient refaire surface.

AUTRE

BERTRAND DAUGERON
chercheur indépendant

Les malheurs de l'herbier Labillardière

QUI AURAIT IMAGINÉ QUE LA CHUTE DE LOUIS XVI BOULEVERSERAIT AUSSI LE DESTIN DES PLANCHES D'UN HERBIER À L'AUTRE BOUT DU MONDE ? C'EST POURTANT LE CONSTAT QUE FIT LE BOTANISTE JACQUES LABILLARDIÈRE À SES DÉPENS. LORS D'UNE ESCALE À JAVA EN OCTOBRE 1793...

Janvier 1793. Après un grand tour de la Nouvelle-Hollande (l'actuelle Australie), *La Recherche* et *L'Espérance*, les deux navires de l'expédition d'Entrecasteaux, jettent l'ancre pour la seconde fois en Terre de Diémen – la future Tasmanie, alors perçue comme la pointe méridionale de la Nouvelle-Hollande. C'est l'été, et les savants de l'expédition multiplient les sorties botaniques. Au cours de leurs explorations, le naturaliste Jacques Labillardière récolte une sorte de petite pâquerette aux reflets bleutés, qu'il nomme *Lagenophora stipitata*. À l'instar des quelque 4000 spécimens qu'il a rapportés, la fleur rejoint une planche de son herbier. Conservée depuis le milieu du XIX^e siècle au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, cette pâquerette (*ci-contre*) aurait pu continuer à servir de référence aux botanistes pendant de

nombreuses années, mais son destin s'est brusquement arrêté en mars 2017.

Aujourd'hui, la botanique ne classe plus les plantes sur leurs éléments morphologiques externes, mais à partir de leur génome. Toutefois, lorsqu'il s'agit de comparer l'état de la flore d'aujourd'hui à celui d'hier pour, par exemple, observer les conséquences du réchauffement climatique, il est nécessaire de revenir aux collections anciennes et à leurs plantes conservées sur planche. En mars 2017, dans le cadre d'une telle étude, le Muséum a donc prêté une centaine de planches de son herbier à l'université de Brisbane, en Australie – dont celle de notre pâquerette. C'était compter sans le zèle des douanes australiennes, drastiques sur l'application des règles de biosécurité. À cette frontière qu'aujourd'hui aucune soupe lyophilisée ne passerait, le colis, affranchi à seulement deux euros, attira l'attention. Et en l'absence de

> réponse de son expéditeur, la sanction fut sans appel : l'incinération.

Depuis, Français comme Australiens déplorent cette incompréhensible erreur. Et pour cause : parmi les spécimens envoyés, certains, dont la pâquerette, étaient des « types », c'est-à-dire des exemplaires conformes à ceux que Labillardière avait choisis pour décrire les espèces correspondantes. En d'autres termes, il s'agissait des uniques doubles appartenant aux plus anciennes récoltes faites en Australie et servant de référents en France, les originaux – les « holotypes » – étant conservés non pas au Muséum, mais à l'Institut botanique de Florence... Une perte inestimable. Pourtant, la pâquerette et les autres spécimens de la collection Labillardière avaient survécu à de nombreuses autres péripéties. Cueillie quelques jours après l'exécution de Louis XVI et quelques mois avant la création du Muséum, la petite fleur avait en effet été projetée au cœur de grands changements scientifiques et politiques aux conséquences inattendues pour les collections naturalistes...

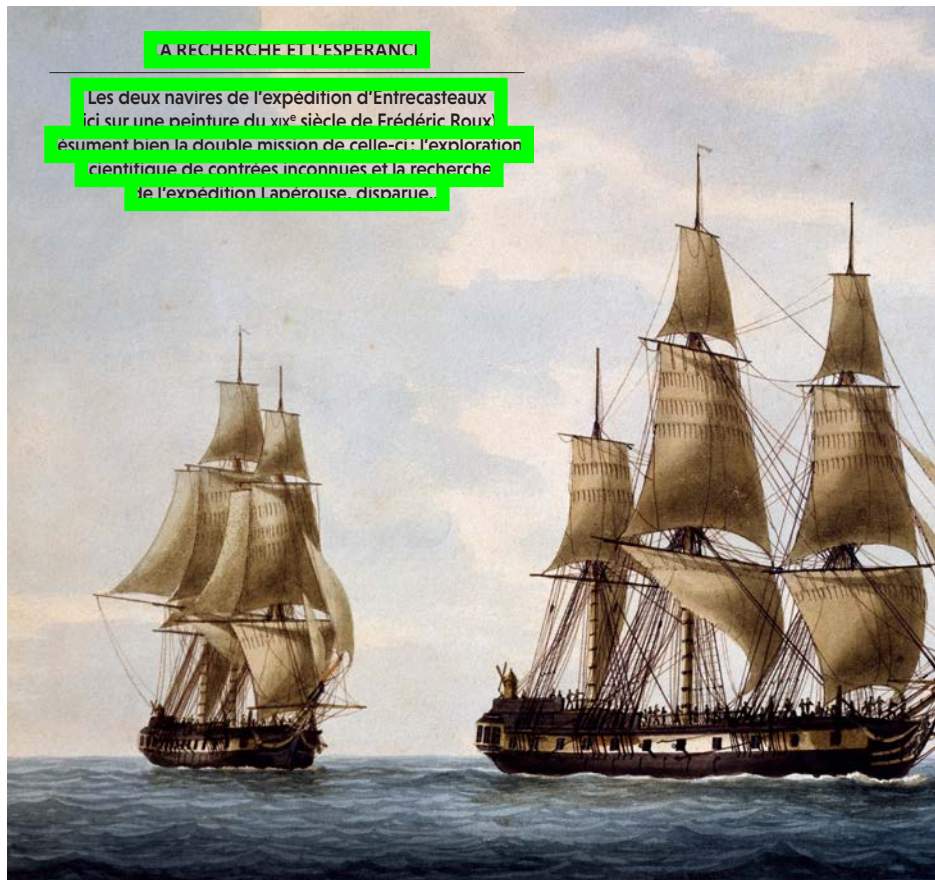
LA RÉVOLUTION S'EMPARA DU JARDIN DU ROI

Dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, l'histoire naturelle est en pleine mutation. Deux ambitions se détachent. D'un côté, le naturaliste suédois Carl von Linné et d'autres défendent une classification systématique de la nature : pour eux, notamment, la connaissance du végétal passe par une description morphologique des caractères extérieurs de la plante, puis par une classification sur quelques critères hiérarchisés, à l'exemple du système sexuel de Linné sur le nombre d'étamines ou de la méthode des familles naturelles d'Antoine-Laurent Jussieu. Dans ce cadre, la constitution d'herbiers des nouveaux et « nouveaux nouveaux » mondes est une condition des progrès de la botanique. Il s'agit de comparer des végétaux du monde entier en dépit de leurs origines géographiques distinctes. Or les dons et les achats ne suffisent pas à rassembler des collections exhaustives. Aussi les explorations botaniques se multiplient-elles. Les voyages de découverte anglais, français et espagnols offrent alors un soutien logistique inédit. Un même collecteur peut désormais faire le tour du monde en quelques années. Encyclopédisme, collections et explorations se conjuguent dans un même mouvement vers un idéal de connaissance au-delà des horizons connus, un rassemblement d'objets et une expérience des lointains.

De l'autre côté, Louis Georges Leclerc, comte de Buffon, alors intendant du Jardin du roi et de son Cabinet d'histoire naturelle – les futurs Jardin des plantes et Muséum –, refuse toute classification. Il défend une approche descriptive plus littéraire qui ne passe pas par les

À RECHERCHE ET L'ESPERANCE

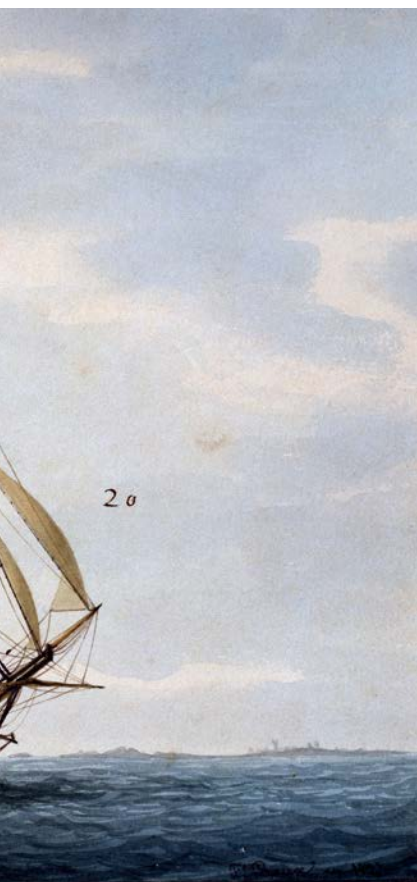
Les deux navires de l'expédition d'Entrecasteaux, ici sur une peinture du XIX^e siècle de Frédéric Roux, résument bien la double mission de celle-ci : l'exploration scientifique de contrées inconnues et la recherche de l'expédition Lapérouse, disparue.



collections. L'objet n'est pas au centre de sa démarche. À sa mort en 1788, à la veille de la Révolution, il laisse le Jardin et le Cabinet du roi dans une situation critique, avec des collections éparées, un programme d'enseignement mince et d'importantes dettes.

La Révolution fait du Jardin et du Cabinet du roi un musée d'importance mondiale grâce à de nombreuses saisies et confiscations. L'enseignement de l'histoire naturelle et le recours aux collections s'inscrivent dans un idéal républicain de connaissance. Les révolutionnaires veulent régénérer le peuple par le savoir et, dans ce cadre, les collections d'histoire naturelle sont utiles à l'Instruction nationale. Celles-ci seront classées selon la théorie linnéenne. De grands naturalistes proches du pouvoir, comme René Desfontaines, défendent en effet les idées du naturaliste suédois et ont même fondé la Société linnéenne de Paris.

C'est elle, devenue la Société d'histoire naturelle de Paris, qui organise l'expédition l'Entrecasteaux, laquelle doit à la fois partir à la recherche de l'expédition Lapérouse, qui ne donne plus de nouvelles depuis 1788, mais aussi poursuivre les collectes dans le Pacifique. Quand les deux navires quittent le port de Brest, le 21 septembre 1791, Louis XVI vient de signer la nouvelle constitution. Antoine Bruny d'Entrecasteaux est un chef de guerre



qu'il a choisi, mais l'Assemblée constituante a validé l'équipage, qui mêle royalistes et républicains, dont Labillardière.

Le goût des voyages lui est venu lors de son apprentissage de la médecine à Montpellier, puis à Paris où, parallèlement, il a étudié la botanique. En 1786, il est parti en Syrie et au Liban pour reconnaître des plantes décrites dans des ouvrages anciens grecs et arabes. Auparavant, en 1782, il avait rejoint l'Angleterre afin de préparer le voyage de Lapérouse en se renseignant sur la culture de plantes exotiques. À cette occasion, il était devenu le correspondant du naturaliste britannique Joseph Banks, compagnon du premier voyage du navigateur James Cook (entre 1768 et 1771) et membre de la Royal Society. Il a rejoint l'équipage d'Entrecasteaux comme naturaliste, aux côtés de Louis Deschamps, de Louis Ventenat et du jardinier Félix Lahaie.

UN BOTANISTE EN TERRE DE DIÉMEN

Le 21 janvier 1793, lorsque Louis XVI, au pied de l'échafaud, s'inquiète de savoir si Lapérouse a été retrouvé, Labillardière pose pour la seconde fois le pied en Terre de Diémen. Ses deux séjours – un mois en avril-mai 1792 et un mois en janvier-février 1793 – sont exceptionnellement longs pour des expéditions maritimes qui, d'habitude, ne s'arrêtent que quelques jours, le temps de s'approvisionner en bois et en eau. Ils lui permettent de réaliser de nombreuses courses de plusieurs jours à la découverte de la flore et de la faune locales.

Le spectacle des forêts primaires l'impressionne. Dans l'arrière-pays, il campe à la manière des «sauvages». S'il ne les rencontre qu'à la fin

durable sur ceux qui l'ont vécue. L'expédition quitte la Nouvelle-Hollande avec près de 40 caisses de matériel: environ 4000 plantes, des graines, 1500 insectes, 300 espèces d'oiseaux rares, plusieurs quadrupèdes, des échantillons de bois, des reptiles et des poissons, 11 arbres à pain, des tronçons et des racines, ainsi que des objets de type ethnographique.

LE PIÈGE HOLLANDAIS

C'est sur le chemin du retour que commencent les ennuis. Si, à la différence des collections de Lapérouse, celles de l'expédition d'Entrecasteaux évitent le naufrage, elles n'échappent pas aux saisies. La mort d'Entrecasteaux, victime de la dysenterie le 20 juillet 1793, et les turbulences révolutionnaires compromettent le retour de l'expédition. Le 28 octobre 1793, 25 mois après être partie de Brest, l'expédition, exsangue, se termine dans la rade de Sourabaya, à Java. Les équipages sont si malades que le retour semble techniquement impossible. Mais l'entrée en guerre de la France et de la Hollande durant la Révolution ne facilite en rien les choses. Le gouverneur, comme la Compagnie hollandaise des Indes, voient d'un mauvais œil ce rival européen dans un comptoir mal défendu où les intérêts français pourraient les menacer. De plus, au sein de l'équipage, la nouvelle de l'exécution de Louis XVI, apprise dans la rade, fait éclater au grand jour les clivages politiques entre révolutionnaires et royalistes.

Les royalistes obtiennent le soutien des Hollandais. Les deux bâtiments de l'expédition sont saisis et les collections naturalistes confisquées; elles échappent de peu à la vente aux enchères. Les résultats de l'expédition sont menacés. Les Républicains qui refusent de prêter allégeance au drapeau blanc sont emprisonnés et débarqués de l'expédition. Labillardière est de ceux-là. Durant son incarcération, il se rapproche de Piron, le dessinateur de l'expédition, et rédige avec lui des doubles des documents scientifiques: journaux comme dessins. Les dessins gravés dans l'*Atlas* de Labillardière sont donc des copies faites de sa main. On réalise à quel point la conscience de l'importance et de la fragilité de leurs collections était aiguë à l'époque et les techniques de conservation alors développées.

La zone est infestée par la dysenterie. La mort rôde. Sur 219 membres de l'équipage, seuls 120 reviendront en France. Entre-temps, la Hollande devient la République batave et un allié de la France. Durant l'été 1795, Elisabeth-Paul Rossel, le nouveau chef de l'expédition, quitte Java avec une partie des collections – principalement les cartes, les relevés hydrographiques et les journaux de bord – sur un navire hollandais. Mais les Anglais interceptent le navire. Et Rossel, considérant que les résultats du voyage appartiennent au roi et non à la Nation, reste sur

Si les collections évitent le naufrage, elles n'échappent pas aux saisies

du séjour, il croise beaucoup de huttes et autres abris sommaires et, parfois, tente d'y dormir. Ses compagnons et lui se sentent observés. La rencontre a lieu lors d'une dernière course botanique du côté de la baie de la Recherche – une rencontre fraternelle qui laisse une impression

Le territoire anglais avec l'espoir de donner les collections à Louis XVIII, exilé en Angleterre. Finalement, les Anglais récoltent tous les fruits de la campagne d'exploration, les collections apportées par Rossel comme celles restées à Java, qu'ils arraisonnent lors de leur transfert en Europe, à partir de 1795.

Libéré à la naissance de la République batave, Labillardière met un certain temps pour rentrer à Java, par ses propres moyens. D'autres républicains ont moins de chance: Piron, trop malade, ne reviendra pas. Louise Girardin, qui s'était embarquée comme commis sous le nom de Louis, non plus. En 1796, de retour en Europe, Labillardière demande la restitution des collections. Parallèlement, il rejoint la Commission temporaire d'Italie et participe à la saisie des collections du Vatican et de Rome, dans la foulée des armées de Bonaparte. Étrange calendrier où les collections d'art et de sciences sont au cœur de toutes les convoitises.

Quand, enfin, Banks, l'ami anglais de Labillardière, reçoit la lettre que ce dernier lui avait envoyée deux ans plus tôt de Java, à sa libération, il intercède en sa faveur. Grâce à lui, Labillardière récupère presque tout son bien, mis à part ses plantes récoltées au Cap et à l'énériffe. Parmi les collections retrouvées figurent ses manuscrits, beaucoup de dessins, ainsi qu'une grande quantité d'«instruments à l'usage des peuplades des mers du Sud». Malgré l'absence des journaux de bord et des observations astronomiques, Labillardière rédige en toute hâte son récit du voyage, avec le soutien de l'Académie des sciences. Les journaux et les cartes recopiées par l'Amirauté britannique sont restitués en 1802.

L'HERBIER EST DISPERSÉ

La petite pâquerette a donc rejoint son cueilleur après moult rebondissements géopolitiques en mer. Sur terre, elle n'est cependant pas plus à l'abri, cette fois des pratiques naturalistes. À lire les instructions des voyages scientifiques, il apparaît clairement que le propriétaire des collections est la Nation. Toute collecte s'effectuerait dans un cadre public. Est-ce un fait ou un souhait? Car la réalité est tout autre et, s'agissant des herbiers, la collection semble personnelle avant d'être publique, à moins que la propriété intellectuelle prenne le dessus? La valeur de l'herbier n'est pas que scientifique et la force est de constater que certains ensembles, comme les herbiers Jussieu et Labillardière, ont fait l'objet d'une appropriation privée.

Labillardière a un caractère difficile. Il passe pour quelqu'un de misanthrope, mais aussi de scrupuleusement honnête. Jamais il n'abandonnera ses idéaux républicains et il refusera de se plier à l'Empire malgré son élection à l'Académie. Il ne reçoit aucune compensation financière pour les privations endurées

durant sa détention. Est-ce pour cette raison qu'il conserve son herbier, le fruit de son travail, l'œuvre de sa vie? À sa mort, en 1834, ses collections ne sont pas pour autant transférées au Muséum national d'histoire naturelle.

L'âge d'or du Muséum s'achève en effet. À sa création en juin 1793 sur les restes d'un Jardin du roi en perdition, le Muséum s'est transformé sous l'impulsion du mouvement révolutionnaire. Douze chaires ont été créées, chacune chargée d'enseigner une spécialité et de dresser un catalogue complet d'une collection en lien avec celle-ci. Le Muséum s'est agrandi pour héberger des nouveaux spécimens. Mais au fil des ans, le poids de la tâche et le manque de

VOYAGE EN TERRE INCONNUE

Un feu allumé vers le sud, à un myriamètre (10 km) de distance, nous apprenait que près de nous il habitait des Sauvages, quoiqu'on n'en eût encore aperçu aucun. Les hommes de l'équipage, pour m'avancer vers le nord-est. Nous fûmes saisis d'admiration à la vue de ces antiques forêts que la hache n'avait point encore dégradées. L'œil était étonné de la prodigieuse élévation de ces arbres ; quelques-uns de la famille des myrtes avaient plus d'un demi-hectomètre (plus de cent cinquante pieds) de haut ; leurs sommets touffus sont couronnés d'un feuillage toujours vert : plusieurs, tombant de vétusté, trouvent un appui sur leurs voisins, et ne sont rendus à la terre qu'à mesure qu'ils se détruisent. La végétation la plus vigoureuse forme un admirable contraste avec cet état de dépérissement, et l'on voit dans toute sa grandeur l'imposant tableau de la nature qui, livrée à elle-même, ne détruit que pour recomposer.

ACQUES LABILLARDIÈRE

Relation du voyage à la recherche de La Pérouse, 1800



Sur les traces de Labillardière, en Tasmanie, du côté de la Baie de la Recherche.



l'expédition d'Entrecasteaux fit le tour de la Nouvelle-Hollande à la recherche des navires de Lapérouse

BIBLIOGRAPHIE

3. Daugeron, **A la recherche de l'espérance : Revisiter la recherche des Aborigènes tasmaniens avec les Français, 1772-1802.** Ars anodemica. 2014

3. Daugeron, **Collections naturalistes entre science et empires (1763-1804),** MNHN. 2004.

2. Morat et al. (dir), **L'Herbier du monde : Cinq siècles d'aventures et de passions botaniques au Muséum d'histoire naturelle.** Les Arènes. 2004

1. Richard, **Le Voyage d'Entrecasteaux à la recherche de Lapérouse,** CTHS. 1986.

noyens, l'institution décline peu à peu. Dans les années 1830, les grandes collections changent de mains au hasard des successions, le Muséum étant dans l'incapacité de les racheter. C'est ce qui se produit avec l'herbier de Labillardière, que ses héritiers séparent entre deux acheteurs principaux: Benjamin Delessert, un riche banquier, et Philip Webb, un Anglais botaniste.

Installé à Paris depuis les années 1820, Philip Webb est un grand collectionneur de botanique. Le Webb Herbarium, qui sera cédé plus tard à Florence, en Italie, contient alors 300000 spécimens. Parmi eux, les 3000 plantes des mers du Sud collectées par Labillardière sur les 4000 rapports de son voyage, dont les holotypes avec leur description autographe... et la petite pâquerette. À la suite de son achat, Webb distribue des doubles à d'autres grands herbiers européens comme celui du Jardin des plantes de Paris ou encore celui de Delessert pour la Nouvelle-Hollande et la Terre de Diémen, car l'échange des doubles est très courant à l'époque. C'est lors d'un tel échange que la petite pâquerette, de même que d'autres doubles de la collection Labillardière, a enfin rejoint les quelque 5 millions de planches de l'herbier du Muséum où elle reposait sans histoire jusqu'en mars 2017.

Nombre d'autres pièces n'ont en revanche jamais refait surface, en particulier parmi les

collections ethnographiques. Malgré la certitude que les objets collectés par Labillardière lui ont été rendus en 1796 avec les restitutions anglaises, il n'existe pas de registre montrant leur intégration dans des collections publiques. Les archives de la Bibliothèque nationale ne mentionnent aucune entrée; quant au Muséum, il s'est séparé de ce type d'articles en 1797 en les envoyant vers l'éphémère « Muséum des antiques » et ses registres ne portent aucune mention des collections d'Entrecasteaux.

Pourtant, dans l'Atlas de Labillardière, de nombreuses représentations suggèrent que les objets étaient sous les yeux du dessinateur. De fait, certains sont réapparus dans des collections publiques, telle celle du Tropenmuseum d'Amsterdam, qui détient quelques objets achetés à Java lors du séjour des Français. D'autres ont été identifiés dans des musées de province comme à Dunkerque. Néanmoins, il est probable que nombre de trésors issus des collections de Labillardière et d'autres dorment encore *incognito* dans les réserves de musées, attendant qu'une archéologie méticuleuse des collections les mette au jour. Les mésaventures de la petite pâquerette motivent-elles le Muséum national d'histoire naturelle à renouer avec son histoire et celle de ses collections? ■

Le CNRS propose un catalogue de plus de **230 formations technologiques** à destination des entreprises pour l'année 2018

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

DONNEES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

BIOINFORMATIQUE

GENIE LOGICIEL ET SYSTEMES D'INFORMATION

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

SCIENCES DE L'INGENIEUR

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

CHROMATOGRAPHIE, SPECTROSCOPIE

SPECTROMÉTRIE DE MASSE

RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE

MICROSCOPIE

BIOLOGIE CELLULAIRE

BIOLOGIE MOLECULAIRE ET BIOCHIMIE

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

RISQUES, ORGANISATIONS ET CHANGEMENTS

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

LES NOUVEAUTES PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2018

DONNEES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

► **Deep learning pour le traitement**

automatique des langues

du 26/03 au 28/03/2018

Marseille - 3 jours

150 €

► **Intelligence artificielle : état de l'art et applications**

du 28/03 au 30/03/2018

Paris - 3 jours

1 800 €

► **Gargantext pour l'analyse exploratoire de grands corpus textuels (exploitation)**

du 28/05 au 30/05/2018

Paris - 3 jours

1 300 €

► **Gargantext pour l'analyse exploratoire de grands corpus textuels (développement)**

le 31/05/2018

Paris - 1 jour

500 €

► **Apprentissage statistique : théorie et**

application

du 04/06 au 06/06/2018

Lyon - 3 jours

300 €

► **Machine learning sous Python**

du 11/06 au 13/06/2018

Rennes - 2.5 jours

800 €

► **Apprentissage automatique (machine**

learning) à base de noyaux

du 02/07 au 03/07/2018

Marseille - 2 jours

800 €

► **Analyse statistique des réseaux**

du 28/11 au 30/11/2018

Paris - 3 jours

300 €

BIOINFORMATIQUE

► **ChIP-seq, RNA-seq et Hi-C : traitement**

analyse et visualisation de données

du 26/06 au 29/06/2018

Montpellier - 4 jours

700 €

GENIE LOGICIEL ET SYSTEMES D'INFORMATION

► **Standards pour l'interopérabilité ERP-MES**

du 09/04 au 12/04/2018

Villers-lès-Nancy - 4 jours

800 €

► **Systèmes intelligents de production :**

Pilotage de flux distribués et évaluation de leur performance

du 11/04 au 13/04/2018

Orléans - 3 jours

1 300 €

► **OpenMOLE pour l'analyse et la distribution**

des modèles numériques

du 16/05 au 18/05/2018

Paris - 3 jours

800 €

► **Déboçage HPC**

du 08/11 au 09/11/2018

Orsau - 1.5 jour

500 €

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

► **Analyse de réseaux en sciences humaines**

et sociales, transport et logistique

du 09/04 au 10/04/2018

Paris - 2 jours

100 €

► **Modélisation graphique des villes et**

territoires

du 04/06 au 05/06/2018

Paris - 2 jours

800 €

► **Micro-tomographie par rayons X :**

Applications pratiques en sciences

naturelles et en archéologie

du 04/06 au 06/06/2018

Paris - 2.5 jours

1 000 €

► **Stratégies et enjeux des techniques de relevé numérique 2D/3D pour la**

documentation et l'étude de monuments et sites patrimoniaux

du 04/07 au 06/07/2018

Marseille - 3 jours

1 100 €

► **Photogrammétrie multidimensionnelle : méthodes avancées et applications pour**

l'archéologie avec le logiciel open source MicMac

du 05/11 au 09/11/2018

Glux-en-Glenne - 5 jours

500 €

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



SCIENTES DE L'INGENIEUR

- Internet des objets : comprendre les concepts et les enjeux
du 15/03/2018
Orsay - 1 jour 200 €
- Python pour l'instrumentation et les interfaces graphiques : des protocoles de communication à la visualisation / représentation des données
du 19/03 au 23/03/2018
Bordeaux - 4 jours 1 400 €
- Internet des objets : développer, déployer et tester sur FIIT IoT-LAB
du 27/03 au 29/03/2018
Strasbourg - 3 jours 800 €
- IIOT et développement durable
du 22/05 au 24/05/2018
Nancy - 3 jours 1 200 €
- Modélisation / identification de systèmes dynamiques à partir de données expérimentales
du 04/06 au 08/06/2018
Nancy - 4,5 jours 2 000 €
- Ethernet pour applications critiques
du 27/06 au 29/06/2018
Nancy - 2,5 jours 1 000 €
- Problèmes inverses : méthodes et applications
du 26/09 au 28/09/2018
Marseille - 3 jours 300 €
- Gestion éco-responsable des datacentres : une approche pratique et globale
du 16/10 au 18/10/2018
Orsay - 3 jours 300 €

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

- Mesure de température sans contact
du 04/04/2018 au 06/04/2018
Orléans - 3 jours 500 €

CARACTERISATION DES MATERIAUX

- Mouillage et phénomènes superficiels
du 22/03 au 23/03/2018
Orsay - 2 jours 1 000 €
- Mousses et émulsions liquides : génération, stabilité et propriétés
du 28/03 au 30/03/2018
Strasbourg - 3 jours 500 €
- DMA : analyse mécanique dynamique pour la caractérisation de matériaux
du 03/10/2018
Mulhouse - 1 jour 300 €

CHIMIE, SYNTHESE, PROCÉDES

- La photopolymérisation : état de l'art et utilisations avancées
du 31/05 au 01/06/2018
Mulhouse - 2 jours 1 200 €
- Synthèse organique en microréacteurs et flux continu : initiation
du 07/06 au 08/06/2018
Orsay - 2 jours 800 €
- Métriques de la chimie verte pour une optimisation éco-compatible
du 25/06 au 26/06/2018
Orsay - 2 jours 800 €
- Propriétés physiques des lipides : des matériaux solides aux phases hydratées
du 07/11 au 09/11/2018
Châtenay-Malabry - 3 jours 400 €

CHROMATOGRAPHIE, SPECTROSCOPIE

- Analyse d'échantillons biologiques : préparation, séparation, détection et validation
du 20/11 au 23/11/2018
Orléans - 4 jours 800 €

MICROSCOPIE

- Microscopie optique en lumière polarisée
du 12/06/2018
Orsay - 1 jour 300 €
- Cryo-tomographie électronique de spécimens vitrifiés en films minces
du 17/09 au 21/09/2018
Rennes - 5 jours 2 000 €
- Vidéo-microscopie photonique appliquée aux micro-organismes : acquisition et analyse des données
du 24/09 au 26/09/2018
Marseille - 3 jours 500 €
- Optical control of brain functioning with optogenetics and wave front shaping
du 08/10 au 12/10/2018
Paris - 5 jours 250 €
- ImageJ/FIJI : traitement et analyse d'images de microscopie
du 12/11 au 14/11/2018
Gif-sur-Yvette - 3 jours 1 100 €
- Automatisation du traitement d'images : du langage macro au machine learning et analyse de données sous ImageJ, FIJI, R, WEKA et Ilastik
du 03/12 au 06/12/2018
Marseille - 4 jours 600 €

- La microscopie optique de fluorescence super-résolue : de la théorie à la pratique
du 04/12 au 07/12/2018
Orsay - 4 jours 500 €

BIOLOGIE CELLULAIRE

- Les contaminations dans les cultures cellulaires
du 18/10/2018
Illkirch - 1 jour 150 €

BIOLOGIE MOLECULAIRE ET BIOCHIMIE

- NGS pour l'analyse des modifications épitranscriptomiques des ARNs
du 22/05 au 25/05/2018
Nancy - 3 jours 250 €
- Epigenetics: DNA methylation and bisulfite treatment
du 02/07 au 04/07/2018
Perny - 3 jours 500 €

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

- Elevage et expérimentation chez un primate modèle : le microcèbe
du 20/06 au 22/06/2018
Brunoy - 3 jours 300 €
- Gestion d'une animalerie de poissons modèles (poisson-zèbre et médaka) : stage en immersion - Nous consulter
Gif-sur-Yvette - 3 jours 150 €
- Injection et transgénèse des poissons modèles (poisson-zèbre et médaka) : stage en immersion en laboratoire
Nous consulter
Gif-sur-Yvette - 2 jours 300 €

RISQUES, ORGANISATIONS ET CHANGEMENTS

- Norme ISO 9001 version 2015 : mise en place dans un laboratoire de recherche
du 24/09 au 25/09/2018
Orléans - 2 jours 200 €
- Le changement climatique et ses impacts
du 08/11 au 09/11/2018
Paris - 2 jours 100 €

R

ENDEZ-VOUS

2.80 Logique & calcul
2.86 Art & science
2.88 Idées de physique
2.92 Chroniques de l'évolution
2.96 Science & gastronomie
2.98 À visiter

CINQ ÉNIGMES POUR LA RENTRÉE

Un bon problème mathématique doit avoir une solution qui ne vient pas toute seule. En voici cinq exemples...

WATMOR:



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

Un de mes professeurs parlait de démonstration « âne-qui-trotte » pour désigner les démonstrations qu'on mène en appliquant les définitions de base et en opérant quelques calculs et déductions faciles, n'exigeant aucun effort. Parmi les démonstrations préférées des mathématiciens sont celles où les techniques usuelles échouent et où il faut contourner le problème, le prendre par surprise, introduire des éléments qui n'ont en apparence aucun rapport avec l'énoncé et qui brusquement dénouent les difficultés.

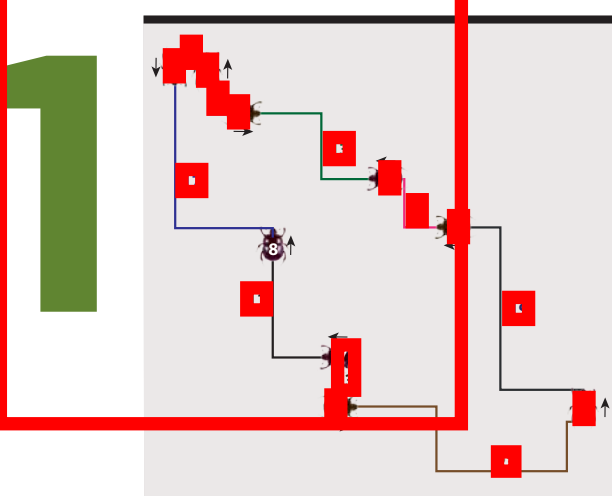
De nombreux lecteurs m'ont écrit à la suite de l'article du mois de février où je présentais sept situations miraculeuses propres à réjouir les amateurs de mathématiques de toutes catégories. Puisque ces petits miracles ont intrigué et amusé, en voici cinq autres exposés sous la forme d'énigmes.

ÉNIGME 1: NEUF SCARABÉES ET DES NOMBRES PREMIERS

On place neuf scarabées sur un circuit, les écarts entre deux scarabées consécutifs, mesurés en mètres le long du circuit, étant l'un des neuf premiers nombres premiers 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19 et 23. L'ordre est quelconque et chacun des nombres apparaît une fois exactement. Si l'on fixe arbitrairement le scarabée considéré comme premier, il y a par exemple un écart de 5 mètres entre le premier et le deuxième (en tournant dans le sens horaire), de 13 mètres entre le deuxième et le troisième, de 7 mètres entre le troisième et le quatrième, puis 19, 23, 3, 11, 17 et 2 (entre le dernier et le premier).

Au départ, chaque scarabée choisit au hasard s'il ira, à 1 mètre par minute, dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse. Quand deux scarabées se rencontrent, ils font instantanément demi-tour. On suppose que la taille des scarabées est négligeable. Au bout de 50 minutes, après de multiples rencontres et demi-tours des neuf scarabées, on note leurs positions et les écarts qui les séparent. Les neuf écarts sont encore les neuf premiers nombres premiers! Comment expliquer ce miracle arithmétique?

LES NEUF SCARABÉES



Solution: Notons que le circuit a une longueur de 100 mètres, car $2+3+5+7+11+13+17+19+23=100$. Si A est un point du circuit, appelons « point opposé à A » le point B situé à 50 mètres sur le circuit, c'est-à-dire le point à égale distance de A que l'on circule dans le sens horaire ou dans le sens antihoraire.

Imaginons que chaque scarabée porte un drapeau (comme pour l'un des problèmes de février) et que lorsque deux scarabées se rencontrent, ils échangent leurs drapeaux. Chaque drapeau tournera toujours dans le même sens à la vitesse de 1 mètre par minute et, à chaque instant, chaque scarabée portera un seul drapeau.

En cinquante minutes, chaque drapeau aura donc parcouru 50 mètres, ce qui est la moitié exactement de la longueur totale du circuit. Il sera donc arrivé au point opposé à son point de départ. Les positions des scarabées sont les mêmes que les positions des drapeaux, car chaque scarabée, même s'il a changé de drapeau, porte exactement un drapeau. Si le circuit était circulaire, le dessin de leurs positions serait le symétrique par rapport au centre du cercle du dessin initial des positions, et donc les écarts entre scarabées consécutifs seraient les mêmes qu'au départ, c'est-à-dire les neuf premiers nombres premiers. Ces nombres apparaissent dans le même ordre qu'au départ à la condition de tourner dans le sens des aiguilles d'une montre et de partir du scarabée situé au point opposé à celui où se trouvait le premier scarabée dans la description initiale. Que le circuit ne soit pas circulaire ne change pas cette propriété des écarts, qui ne dépend que de la notion de point opposé, et les écarts entre scarabées au bout de 50 minutes sont bien les neuf premiers nombres premiers.

Bien sûr, l'information que les distances sont les nombres premiers n'a aucune importance et constitue un piège: seule leur somme 100 (double de 50) intervient dans la solution.

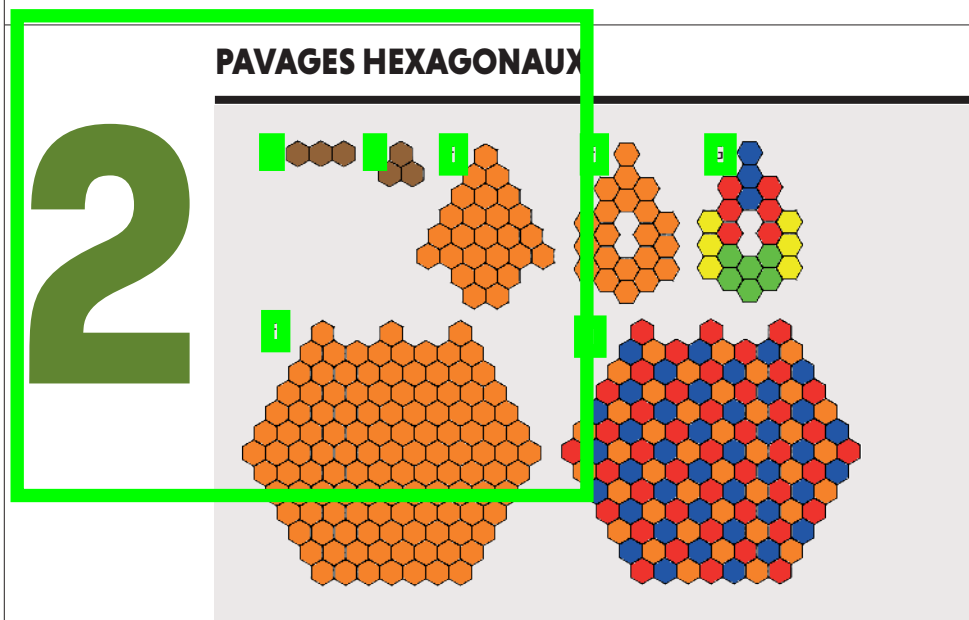
Notons aussi que ce qui se produit au bout de 50 minutes se produit aussi pour 100 minutes, 150 minutes, etc. mais qu'entre ces moments particuliers, les écarts entre scarabées n'ont pas de raison d'être des nombres premiers.

ENIGME 2: DES PAVAGES HEXAGONAUX IMPOSSIBLES

En utilisant des copies des formes A et B (voir l'illustration 2), il faut recouvrir parfaitement les figures F_1 , F_2 , F_3 , ou montrer que c'est impossible (les raisonnements d'impossibilité sont importants en mathématiques et on peut les rechercher pour s'entraîner).

On cherche donc à paver F_1 , F_2 et F_3 à l'aide des triples hexagones A et B dont on dispose l'autant d'exemplaires que souhaité.

Pour la première forme F_1 , c'est impossible car elle est composée d'un nombre d'hexagones (26) qui n'est pas un multiple de 2: or si



l'on pave une forme avec A et B, elle sera forcément composée d'un nombre d'hexagones multiple de 2.

Pour la deuxième forme F_2 , le nombre d'hexagones (21) est un multiple de 3 et on peut donc envisager de la paver avec des A et des B. C'est pourtant impossible, comme on le voit en raisonnant sur la figure G_1 . Pour paver la sorte de pointe en haut (*en bleu*), il faut nécessairement utiliser le pavé A. Ce qui reste alors à paver comporte encore deux sortes de pointes (*en rouge*) qui exigent à nouveau l'utilisation du pavé A, deux fois. Ce qui reste exige à nouveau deux fois la forme A (*en jaune*). Ce qui reste alors (*en vert*) est clairement impossible à paver avec A et B. Le raisonnement s'est déroulé rigoureusement en ne laissant aucune possibilité inexplorée: paver F_2 avec des A ou B est impossible.

La troisième forme F_3 est elle aussi impossible à paver avec des A ou B, mais c'est moins évident. Comment le démontrer?

Solution: La méthode utilisée pour la forme F_1 ne marche pas, car F_3 contient 123 hexagones, et 123 est multiple de 3. On peut essayer et raisonner en utilisant un argument du même type que celui mené pour F_2 . J'ignore si cette méthode aboutit, mais si c'est le cas cela doit être assez compliqué, car plusieurs positionnements des pièces A et B sont possibles quel que soit le point de départ envisagé pour le pavage. Une chose est certaine, la méthode suivante, à l'aide d'un coloriage, est plus rapide. Elle utilise un élément qui n'apparaît pas dans l'énoncé: on colorie le dessin avec trois couleurs comme sur la figure G_1 .

On note alors que, en plaçant n'importe où sur ce coloriage une forme A ou B, cette forme couvre nécessairement exactement un hexagone bleu, un rouge et un orange. Si l'on pouvait paver F_3 avec des A et des B, cela impliquerait



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

> que F_3 possède autant d'hexagones de chaque couleur. Or F_3 n'a pas le même nombre de pavés de chaque couleur: il y en a 43 de couleur rouge, 40 de couleur bleue et 40 de couleur orange. Elle est donc impossible à paver avec des A et des B.

ÉNIGME 3: SE CONNAÎTRE OU S'IGNORER

Soit k un entier positif. Lorsque n est assez grand, on peut être certain que dans toute assemblée de n personnes, il y en a k qui se connaissent mutuellement, ou alors k qui ne se connaissent pas du tout les unes les autres. Il est intéressant de connaître le plus petit entier n , noté $R(k)$, qui assure cette propriété.

Comme dans l'énigme précédente, nous allons rencontrer une impossibilité; elle est ici encore plus étonnante. Lorsque 6 personnes se rencontrent, alors nécessairement 3 d'entre elles se connaissent mutuellement (a et b se connaissent, b et c se connaissent, a et c se connaissent) ou 3 d'entre elles ne se connaissent pas (a et b ne se connaissent pas, b et c ne se connaissent pas, a et c ne se connaissent pas). On montre cela par le raisonnement (voir plus loin dans le texte) ou en écrivant un programme qui examine tous les cas possibles, qui sont en nombre fini (il y a précisément $2^{15}=32768$ graphes à examiner, les personnes étant représentées par des nœuds et leur connaissance mutuelle par des arêtes). Avec moins de 6 personnes, la propriété n'est plus vraie. Avec plus de 6 personnes, la propriété est bien sûr toujours vraie. On dit que le nombre de Ramsey pour $k=3$ vaut 6, et on écrit $R(3)=6$. Pour $k=4$, le nombre de Ramsey est 18: $R(4)=18$. Vous allez être très surpris concernant $R(5)$, le nombre de Ramsey pour $k=5$. Pourquoi?

Solution: La surprise n'est pas que le nombre $R(5)$ n'existe pas ou qu'il soit très grand. La surprise est que personne aujourd'hui ne connaît ce nombre. On sait juste qu'il est compris entre 43 et 48. L'idée d'énumérer par exemple tous les graphes à 43 nœuds pour savoir si 43 convient ou pas est difficile à mettre en œuvre, même avec les plus puissants ordinateurs, car il y en a trop. En effet, il existe $2^{43 \times 21}$ graphes possibles ayant 43 nœuds, nombre supérieur à 6×10^{271} , or les calculs les plus importants menés pour résoudre des problèmes (par exemple pour casser des systèmes

de chiffrement cryptographique) ne comportent au mieux que 10^{21} ou 10^{22} opérations élémentaires, ce qui est très inférieur au nombre en question ici.

On a longtemps disposé uniquement du majorant 49. Ce n'est que récemment que l'on a gagné une unité et que l'on est certain que $R(5) \leq 48$. Ce progrès est dû à un travail associant des raisonnements et des calculs massifs par ordinateur menés à leur terme en avril 2017 par Vigleik Angelteit et Brendan McKay de l'université australienne à Canberra (voir <https://arxiv.org/pdf/1702.08768.pdf>).

Au sujet de ces nombres si faciles à définir et pourtant si difficiles à calculer, le mathématicien hongrois Paul Erdős s'amuse à faire comprendre qu'on ne pourrait jamais aller très loin dans la connaissance des $R(n)$ en racontant l'histoire suivante:

«Si des extraterrestres bien plus puissants que nous arrivent sur Terre et nous demandent la valeur de $R(5)$ sous la menace d'une destruction totale de la planète, alors il faudra enrôler tous nos ordinateurs et tous nos mathématiciens pour calculer ce nombre. En revanche, s'ils nous demandent $R(6)$, nous n'aurons pas d'autres choix que de tenter de les anéantir.»

Si on se limite à la première partie de l'histoire (l'exigence de calculer $R(5)$), il se peut que l'on soit, même sans menace extraterrestre, capable d'y arriver un jour prochain. En effet, de très gros efforts de calcul ont été entrepris pour trouver des graphes à 43 nœuds qui ne contiennent ni sous-ensemble de 5 nœuds sans lien, ni sous-ensemble de 5 nœuds tous liés. De tels graphes prouveraient que $R(5) > 43$. Ne pas en trouver suggère que $R(5) = 43$ (sans bien sûr que cela puisse être considéré comme une preuve).

Ces recherches infructueuses font cependant espérer que, associé à quelques progrès dans les raisonnements sur ces graphes, on pourrait prochainement prouver définitivement que $R(5) = 43$. Si Erdős était vivant, il faudrait donc qu'il envisage de reformuler son histoire... et moi l'énigme proposée ici. Cela serait facile, car, par exemple concernant $R(6)$, on sait seulement qu'il est compris entre 102 et 165. Pour $R(10)$, notre ignorance est sidérante: on sait seulement qu'il est compris entre 798 et 23556 (voir le tableau de la figure 3). Sur ces questions, voir l'article de S. Radziszowski dans la bibliographie.

Si le calcul massif est parfois indispensable pour calculer des nombres de Ramsey, le raisonnement n'est pas interdit, et c'est peut-être parce qu'on ne le maîtrise pas bien qu'on doit faire appel aux ordinateurs. À titre d'exemple, voici une démonstration que $R(2) = 6$.

Soit une réunion de 6 personnes, parmi lesquelles Alain. Ou bien Alain connaît au moins trois d'entre elles (*cas 1*), ou bien c'est le

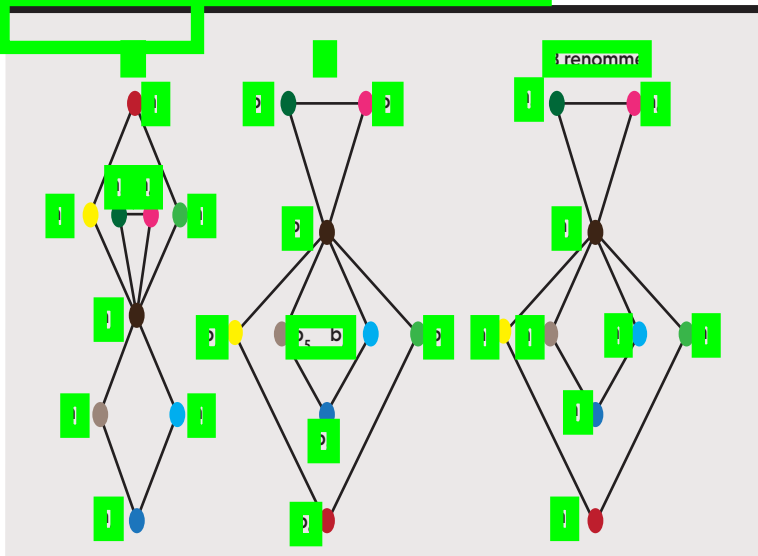
3

LES NOMBRES DE RAMSEY DE 1 A 10

k	$R(k)$
1	2
2	6
3	6
4	18
5	43-48
6	102-165
7	105-540
8	182-1870
9	165-6588
10	798-23556

4

MISE EN COÏNCIDENCE DE GRAPHES



contraire et il ne connaît pas au moins trois d'entre elles (cas 2).

Cas 1. Alain connaît au moins trois autres personnes. Examinons alors les relations que peuvent entretenir les trois connaissances d'Alain entre elles. Si deux d'entre elles se connaissent, alors ces deux personnes et Alain forment un ensemble de trois personnes qui se connaissent. On a obtenu ce qu'on attendait. On peut donc supposer que les trois connaissances d'Alain sont étrangères l'une à l'autre. Dans ce cas, elles constituent trois personnes de l'assemblée qui ne se connaissent pas, on a donc encore obtenu ce qu'on voulait.

Cas 2. Alain ne connaît pas au moins trois des autres personnes. On raisonne comme dans le premier cas, en inversant «connaître» et «ne pas connaître».

Pour voir que 5 personnes ne sont pas suffisantes pour que la propriété «3 se connaissent ou 3 ne se connaissent pas» soit toujours vérifiée, il suffit de considérer la situation suivante: A connaît B, qui connaît C, qui connaît D, qui connaît E, qui connaît A et rien d'autre.

ÉNIGME 4: RENOMMER LES NŒUDS D'UN GRAPHE

Je dispose de deux très grands graphes notés A et B. Je sais qu'ils sont identiques aux appellations des nœuds près, c'est-à-dire qu'en changeant les noms des nœuds du second par les noms de nœuds du premier et en les plaçant correctement, alors les arêtes des deux graphes sont les mêmes.

Dit autrement, si les arêtes étaient de parfaits élastiques et si je pouvais déplacer les nœuds du second graphe, je pourrais faire coïncider parfaitement les deux graphes (voir la figure 4). Lorsque les graphes sont très grands, ces mises en coïncidence sont difficiles à trouver, ce qui fait que l'on peut utiliser la connaissance d'une telle mise en coïncidence comme méthode d'authentification.

Supposons que j'aie eu beaucoup de mal à trouver cette mise en coïncidence par changement des noms, et que mon ami Jacques, qui trouve intéressant le changement des noms qui provoque la mise en coïncidence, souhaite me l'acheter. Il n'a pas confiance en moi car je l'ai escroqué dans une précédente affaire. Il veut que je lui prouve que je dispose de cette mise en coïncidence avant de me l'acheter. Je n'ai pas non plus confiance en lui car lui aussi m'a escroqué récemment (nous ne sommes d'ailleurs plus vraiment amis...). Je ne veux donc pas lui communiquer la moindre information sur la mise en coïncidence dont je dispose car cela pourrait l'aider à la trouver et il ne me l'achèterait pas. Je veux en revanche lui prouver que je connais ce changement des noms du graphe B. Comment mener une telle opération qui semble logiquement impossible?

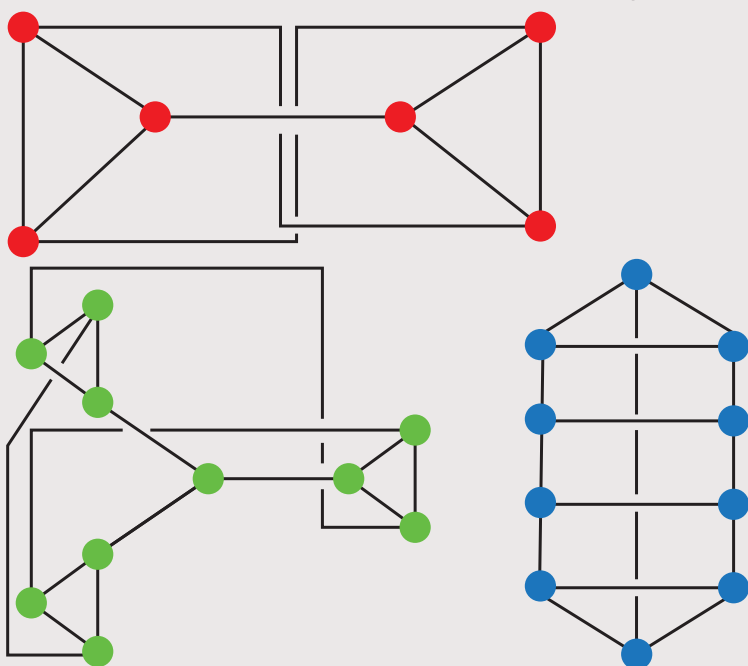
Solution: Le problème est classique et sert souvent comme exemple de «preuve à divulgation nulle de connaissance», un type de protocole utile en cryptographie. Quand deux graphes sont identiques aux noms près des nœuds, on dit qu'ils sont isomorphes, mais nous continuerons à parler simplement de «mise en coïncidence». Voici comment je persuade Jacques.

(a) Je dessine un autre graphe C en changeant les noms des nœuds de A, avec des noms différents de ceux utilisés pour A et B. Je fais bien attention de refaire le dessin en déplaçant les nœuds pour que Jacques ne puisse pas tirer d'informations de la disposition de C. Je le présente à Jacques.

(b) Jacques m'indique alors librement A ou B (éventuellement, il tire à pile ou face pour choisir).

(c) S'il m'indique A, je lui fournis les changements des noms qui transforment C en A. Cela m'est facile, puisque c'est moi qui ai construit C à partir de A. Jacques vérifie que ce changement des noms transforme bien C en A.

(d) S'il m'indique B, alors je lui indique un changement des noms des nœuds de C qui le transforme en B. J'obtiens ce changement en changeant d'abord les noms de C en ceux de A (par exemple c_1 devient a_8 , etc.), puis en utilisant la mise en coïncidence que j'ai calculée et que je veux lui vendre pour changer les noms de A en ceux de B (a_8 devient par exemple b_3 , etc.). Je lui indique le résultat final de ce double changement des noms (c_1 devient b_3 , etc.) qui



GRAPHES LABYRINTHIQUES

5

bien sûr définit une mise en coïncidence parfaite entre C et B. Jacques vérifie que c'est bien une mise en coïncidence.

(e) En faisant cela une seule fois, quelqu'un ayant de la chance, mais qui ne connaît pas le bon changement des noms entre A et B, peut répondre de façon satisfaisante: il choisit C en décidant de le mettre en coïncidence avec A et Jacques par chance demande A, ou il choisit C en le mettant en coïncidence avec B et par chance Jacques demande B. Avec une probabilité de $1/2$, quelqu'un ne connaissant pas le bon changement de noms entre A et B trompera Jacques.

(f) En revanche, si on opère deux fois ce jeu et que je ne connais pas le bon changement des noms entre A et B, je ne tromperai Jacques qu'une fois sur quatre (il faut que deux fois de suite je gagne à un jeu où j'ai une chance sur deux de gagner). Si l'on recommence le jeu 10 fois, je tromperai Jacques avec une probabilité $1/1024$ ($1024=2^{10}$). Etc.

(g) En opérant le jeu autant que Jacques le souhaitera et en réussissant à chaque fois, Jacques finira par être certain que je dispose bien d'un bon changement de noms entre A et B.

(h) Pourtant, même en faisant le jeu 1000 fois, il n'aura rien appris, car les graphes C que j'utilise à chaque fois et pour lesquels je réponds ne lui apprennent qu'un rapport entre A et C ou entre B et C, ce qui ne dit rien sur les rapports entre A et B.

Jacques se décidera à m'acheter ma mise en coïncidence de A et B.

Ce type de protocoles sert à organiser des systèmes d'authentification. Si je choisis moi-même les deux grands graphes A et B en les prenant isomorphes et en les rendant publics, je pourrai m'authentifier vis-à-vis de tout interlocuteur sans jamais affaiblir la méthode, puisque les échanges envisagés dans le protocole ne laissent échapper aucune information sur l'isomorphisme que j'ai choisi, et que je suis le seul à connaître (voir la bibliographie).

L'isomorphisme de graphes est un problème délicat dont on a du mal à connaître la classe de complexité. Récemment en 2015, puis en 2017 après s'être rétracté, László Babai, un spécialiste réputé de ces questions, a annoncé disposer d'une démonstration que le problème de l'isomorphisme de graphes était à peu de chose près un problème qu'on peut résoudre en temps polynomial, c'est-à-dire assez rapidement. Si c'était confirmé, alors mon ancien ami Jacques risque de ne plus vouloir m'acheter la mise en coïncidence que nous étions en train de négocier.

ENIGME 5: NE PAS SE PERDRE DANS UN LABYRINTHE

On se donne un graphe dont chaque nœud possède exactement 3 arcs (ou arêtes) incidents. On pourrait parler de labyrinthe où les chemins exactement se rencontrent à chaque carrefour. Le graphe n'est pas nécessairement planaire (représentable sur un plan sans que les arcs se croisent), mais en chaque nœud, les trois arcs incidents sont placés dans un même plan horizontal, de façon que lorsqu'on arrive à un nœud par l'un des arcs, il y a un arc à droite et un arc à gauche clairement identifiables.

Quelques exemples de tels graphes sont donnés par la figure 5. On peut les disposer sur un plan en acceptant quelques ponts ou tunnels. Cela permet, quand on parcourt de tels graphes et qu'on arrive à un carrefour, de désigner sans ambiguïté l'arc de droite et l'arc de gauche. Les stratégies de parcours «prendre toujours à droite» ou «prendre alternativement à droite et à gauche» sont des stratégies qui vous ramènent à votre point de départ. Il faut le démontrer!

Premier problème. Vous êtes posé sur un arc du graphe et vous avancez en utilisant la méthode suivante: à chaque fois que vous arrivez à un nouveau nœud, vous choisissez l'arc de droite. Prouvez qu'en avançant ainsi, sans jamais revenir en arrière, vous retournerez nécessairement à votre arc de départ.

Deuxième problème. Vous êtes posé sur un arc du graphe et vous avancez en utilisant une méthode un peu plus compliquée: à chaque fois que vous arrivez à un nouveau nœud, vous choisissez alternativement l'arc de droite ou l'arc de gauche. Prouvez à nouveau que vous serez inévitablement ramené à votre arc de départ.

Notons que lorsque nous avançons en suivant une méthode déterminée, nous pouvons ne jamais revenir au point de départ et par exemple parcourir des arcs qui, à partir d'un certain moment, forment un cycle a-b-c-d-e-c-d-e-c-d-e-c-d-e... Les questions posées ne sont donc pas évidentes.

Solution: Quand vous suivez la méthode 1 et que vous êtes sur un arc dans une direction donnée, vous savez d'où vous venez: en vous retournant et en allant au nœud dont vous venez, l'arc qui vous y a amené est celui de gauche.

Il n'y a qu'un nombre fini de positions possibles sur un arc du graphe et seulement deux directions possibles à partir d'un nœud, donc il n'y a qu'un nombre fini de parcours d'un arc. Quand vous êtes sur un arc dans une direction donnée, la suite de ce que vous allez faire est déterminée. Il en résulte qu'en appliquant la méthode « toujours à droite », vous finirez par retomber sur un cycle. On est donc dans une situation du type a-b-c-a-b-c-a-b-c... ou du type a-b-c-d-e-c-d-e-c-d-e-c-d-e... Dans ces suites, les lettres minuscules désignent des positions sur un arc, donc un arc avec l'indication d'une direction de parcours.

Deux cas sont possibles: soit on entre tout de suite dans un cycle, soit on y entre après quelques parcours d'arcs où l'on ne repassera plus. Il faut montrer que le second cas est impossible. Si on avait une situation du type a-b-c-d-e-c-d-e-c-d-e-..., cela signifierait qu'il y a deux antécédents à c: de l'arc orienté b on passe à c, et de l'arc orienté e on passe à c, cela en suivant la règle « toujours à droite ». C'est impossible puisque, comme on l'a expliqué, on peut savoir d'où l'on vient: ou bien, quand on est en position c, on vient de la position b, ou bien quand on est en position c on vient de la position e. Un seul cas est possible. Puisque la situation où l'on entre dans un cycle après le parcours de quelques arcs par lesquels on ne repassera pas est impossible, cela signifie qu'on entre dès le départ dans un cycle, et donc qu'on revient à son arc de départ avec le même sens de déplacement sur l'arc.

Pour le second algorithme, le raisonnement est assez proche, sauf que cette fois on va considérer les parcours en prenant en compte la liste des arcs et sens de déplacement de l'arc par lesquels on passe, auxquels on ajoute l'information indiquant si l'on doit tourner à droite ou à gauche au prochain nœud. Un parcours sera donc la donnée d'une suite d'arcs orientés (désignés comme précédemment par les minuscules) avec pour chacun l'indication droite ou gauche. Par exemple a/droite—b/gauche—c/droite—d/gauche—...

Quand on est dans une position du parcours conçu de cette façon, on peut revenir en arrière, car l'information supplémentaire droite ou gauche nous indique aussi ce qui s'est passé au

nœud précédent et donc quel arc nous y a amenés. Comme dans le raisonnement précédent, il est clair qu'un parcours revient à un moment ou un autre en une position déjà occupée (car il n'y a qu'un nombre fini de positions x/droite y/gauche). Il faut prouver que cela ne peut pas se faire ailleurs qu'en la position de départ. Le raisonnement est le même que précédemment, avec la nouvelle notion de parcours: si on ne revenait pas au point de départ, l'une des positions aurait deux antécédents, ce qui n'est pas possible. Notons que le raisonnement assure qu'on revient à l'arc de départ en le parcourant dans le même sens et avec l'indication droite. Il n'est donc pas exclu qu'on y soit passé avant avec l'indication gauche ou en le parcourant dans l'autre sens, mais, quel que soit le cas, on revient à l'arc de départ.

Le résultat se généralise. Si, toujours avec un graphe dont tous les nœuds possèdent 3 arcs incidents, on applique une méthode de choix entre droite et gauche périodique, par exemple droite/droite/gauche répété, on sera certain de revenir à son point de départ. Pour le démontrer, on ajoute autant d'informations qu'il faut aux éléments de ce qu'on considérera comme les positions dans un parcours de façon à pouvoir revenir en arrière, et on raisonne comme précédemment en montrant qu'une position ne peut pas avoir deux antécédents.

Pour les graphes quelconques, on peut encore généraliser le résultat en procédant comme suit. On suppose que le plus grand nombre possible d'arcs incidents pour un nœud est N . On suppose qu'à chaque nœud, les arcs sont numérotés de 1 à M avec $M \leq N$. On peut d'ailleurs imaginer que cette numérotation est fixée par celui qui suit le parcours quand il arrive à un nœud pour la première fois. On définit la méthode de parcours en se donnant une suite périodique d'entiers entre 1 et N (par exemple 233142331423314...). On décide de suivre le chemin qui, à chaque nouvel arc rencontré, choisira l'arc correspondant à l'entier K de la suite périodique auquel on est arrivé, cela en respectant la convention suivante: on compte les chemins à partir de celui par lequel on est arrivé, éventuellement en tournant plusieurs fois si l'entier K est supérieur au nombre d'arcs incidents au nœud où l'on se trouve. Par exemple, si on arrive par l'arc 2, qu'il y a 5 arcs arrivant sur le nœud où l'on se trouve et que $K=7$, on repartira par le chemin $2+7=9$ qui est le même que l'arc 4, puisqu'on compte les K arcs en tournant: 3, 4, 5, 1, 2, 3, 4.

Une telle méthode, par un argument d'antécédent unique (qui sera applicable si l'on associe suffisamment d'entiers à chaque arc quand on définit la notion de position), vous ramènera toujours à votre arc de départ. De tels algorithmes de parcours engendrent des promenades complexes tout en préservant l'assurance de ne jamais se perdre. ■

BIBLIOGRAPHIE

ENIGME 1

P. Winkler, **Mathematical Mind-Benders**, chapitre « The adventures of Ant Alice », AK Peters/CRC Press, 2007.

ENIGME 2

J.-P. Delahaye, **Le désordre total n'existe pas**, Pour la Science n° 376, pp. 86-91, février 2009.

R. Graham et al.,

Ramsey Theory, John Wiley & Sons, 1990.

J. Radziszowski, Small

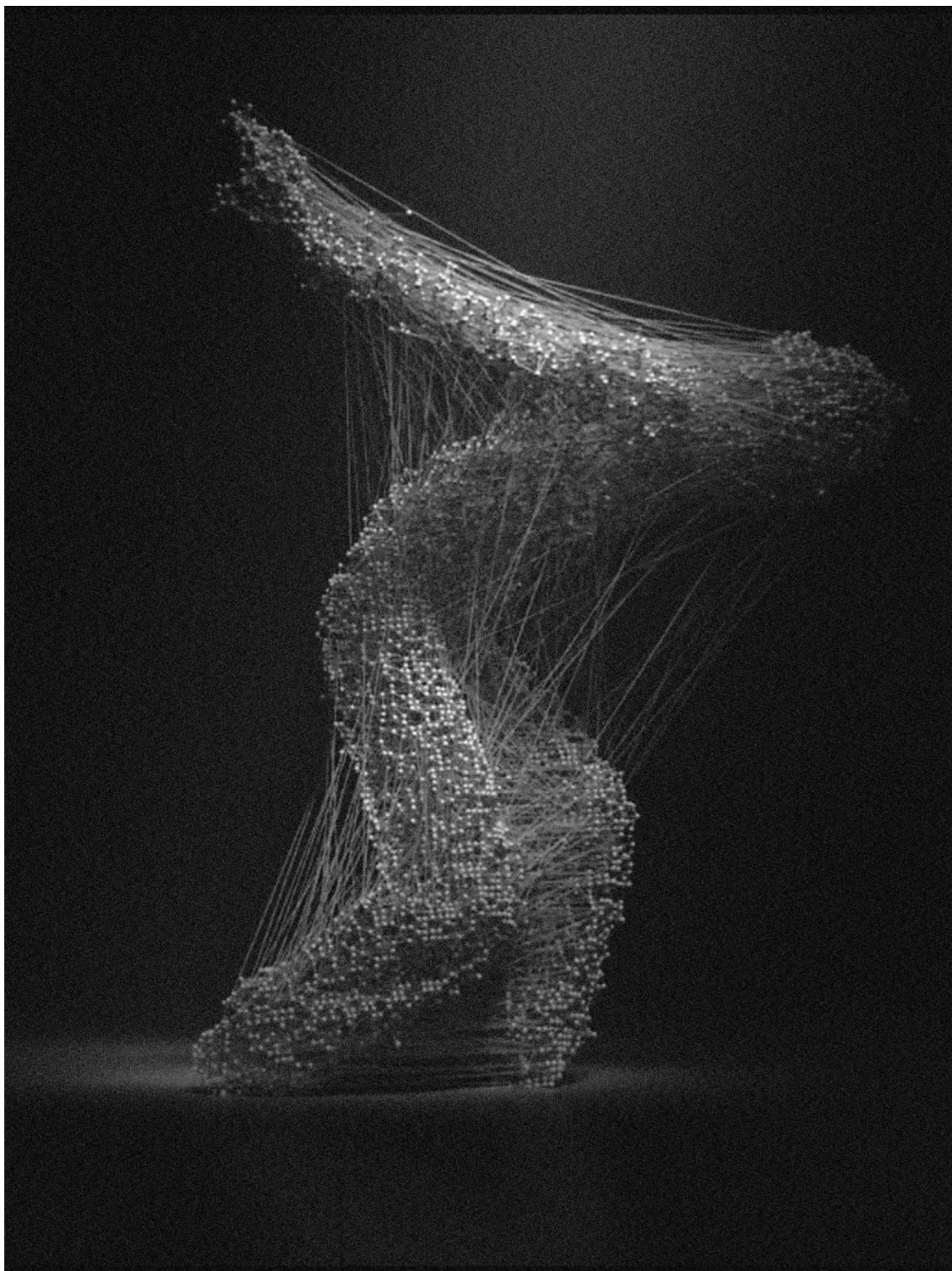
Ramsey numbers, 2017 : <http://bit.ly/2h26G2o>

ENIGME 4

J.-P. Delahaye, **Persuader le son savoir sans le transmettre**, Pour la Science n° 399, pp. 88-93, janvier 2011.

D. Goldreich, Probabilistic

proof systems : A primer, Foundations and Trends in Theoretical Computer Science, vol. 3(1), pp. 1-91, 2008.



Danser pour mettre en échec les systèmes de reconnaissance
automatique de mouvements suspects

AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
de Pour la Science

LE BUG DES CYGNES

Une installation vous propose de pousser dans des retranchements un dispositif de reconnaissance des mouvements, et de le mettre en panne.

particuliers, ces motifs visuels, constitueront une base de données de référence. L'anormalité devient en quelque sorte la normalité.

Enfin, après cette préparation en amont, les visiteurs se confronteront à la machine. Dans un espace d'interactions, ils seront invités à bouger, à proposer de façon ludique des mouvements étonnants que l'installation leur renverra à la façon, par exemple, d'une représentation du corps par particules (voir la figure ci-contre) inspirée du projet *Asphyxia*.

Ces mouvements seront en outre comparés à ceux de la base de données. Et, en cas de coïncidence, ils déclencheront l'arrêt de la machine. Ainsi, un mouvement « suspect » ne déclenchera pas l'alerte, mais au contraire l'arrêt du système. En d'autres termes, la logique mise en œuvre dans l'espace public, notamment à l'aéroport Schiphol, est prise à son propre piège. C'est un pied de nez à la société de contrôle et de surveillance dans laquelle nous vivons.

Bodyfail évoque les travaux du Russe Grigory Bakunov dont l'algorithme crée des maquillages, quelques lignes bien placées sur le visage, qui déjouent les logiciels de reconnaissance faciale.

La prochaine fois que vous croiserez dans la rue un individu au visage barré de lignes sombres et faisant des gestes étranges dénués de toute logique, n' imaginez pas qu'il fait son intéressant: il essaie simplement d'être discret, du moins aux yeux des systèmes de surveillance déployés en milieu urbain... ■

Le site du «Pulsar, The Open Art Prize»: <https://www.pulsar.paris/>



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

E

En 2006, l'Agence nationale de la recherche (ANR) décidait de financer le projet CANAL (Comportements Anormaux: Analyse, Détection, Alerte), porté par le Laboratoire d'informatique de Lille. L'objectif était de pouvoir classer automatiquement les comportements d'individus afin de repérer de potentielles menaces. Les travaux, encore balbutiants, ont déjà un certain succès. Ainsi, en 2014, l'aéroport Schiphol d'Amsterdam s'est équipé de caméras « intelligentes » afin de repérer les mouvements suspects. Ce type de technologie est sans doute appelé à se développer et à envahir notre quotidien. Il va devenir difficile de courir sans attirer l'attention d'une caméra!

Cette problématique est au cœur du projet *Bodyfail* conduit par l'informaticien Clément Barbisan, le chorégraphe Jean-Marc Matos et l'artiste et designer Thomas Guillemet. Ils ont été réunis à l'occasion de la première édition du «Pulsar, The Open Art Prize» qui, sous le parrainage de Gilles Babinet (conseiller auprès de la Commission européenne sur les enjeux de l'économie numérique),

organise des rencontres entre les créateurs du monde artistique et ceux du monde digital. *Bodyfail* est l'un des dix finalistes qui seront départagés en octobre 2017, à Station F (l'incubateur de start-up inauguré en juin dernier), à Paris. Les œuvres des trois lauréats récompensés seront exposées à l'espace Centquatre, à Paris, en décembre.

DANSE AVEC LES BUGS

En quoi consiste le projet *Bodyfail*? En un mot, à faire dysfonctionner un dispositif de reconnaissance des gestes et des mouvements! Détaillons.

Dans une première étape, le trio élabore un algorithme qui analyse les gestes d'individus enregistrés par une caméra Kinect, celle des consoles de jeux basés sur la reconnaissance de mouvements. Le programme (des réseaux de neurones) est conçu à partir d'éléments déjà existants, modifiés et améliorés. Il est fondé sur un apprentissage automatique où la machine apprend pour s'adapter à de nouvelles situations et crée pour ce faire de nouveaux éléments de son propre programme.

Puis vient pour le dispositif une phase d'apprentissage. Grâce à une chorégraphie spécialement conçue, une danseuse lui proposera de nombreux gestes que l'on peut qualifier de «défaillants», c'est-à-dire qu'ils seront désordonnés, dissymétriques, instables... à l'inverse de ceux que nous accomplissons au quotidien. Ces mouvements

LES AUTEURS



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



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

LES TUBES HURLEURS

Des tuyaux en accordéon que l'on fait tourner rapidement produisent un son de hauteur bien définie. Ce n'est pas le cas avec des tuyaux lisses. Quel rôle jouent donc les corrugations des parois ?

Le « tube hurleur » est un jouet musical qui chante lorsqu'on le fait tourner rapidement. La particularité de ce tuyau souple, long d'environ 70 centimètres, est d'être « corrugué », c'est-à-dire d'avoir des parois en accordéon. Bien que sa rotation puisse être passablement assourdissante, cette production spontanée de son peut devenir problématique dans des installations industrielles, notamment les conduites de gaz. Les vibrations engendrées sont parfois assez intenses pour infliger des dégâts aux structures avoisinantes. Quelle est l'origine de ce son ? Et de quoi dépend sa hauteur ?

UN ÉCOULEMENT FORCE POUR PRODUIRE LE SON

Commençons par expérimenter en saisisant un tube hurleur par son extrémité et en le faisant tourner de plus en plus vite. À faible vitesse de rotation, rien ne se

passse. À partir d'une certaine vitesse, le tube produit une note, c'est-à-dire un son de hauteur (ou fréquence) bien définie. Accélérons encore le mouvement : à un deuxième seuil de vitesse, la note change et devient plus aiguë, puis, à un troisième seuil, la note devient encore plus aiguë, et ainsi de suite.

Avec un peu d'entraînement, le musicien amateur jouera à volonté quatre ou cinq notes différentes. Notes dont le mélomane reconnaîtra les intervalles. Entre les deux premières notes, il y a ainsi une quinte, c'est-à-dire un rapport de fréquences de $3/2$. Une octave sépare la troisième note de la première, ce qui correspond à une fréquence double. Ainsi, comme pour un clairon, les notes produites correspondent aux multiples $2f$, $3f$, $4f$ d'une fréquence fondamentale f (qui, elle, n'est pas produite de façon audible).

On reconnaît là les fréquences de résonance d'un tuyau cylindrique ouvert à ses



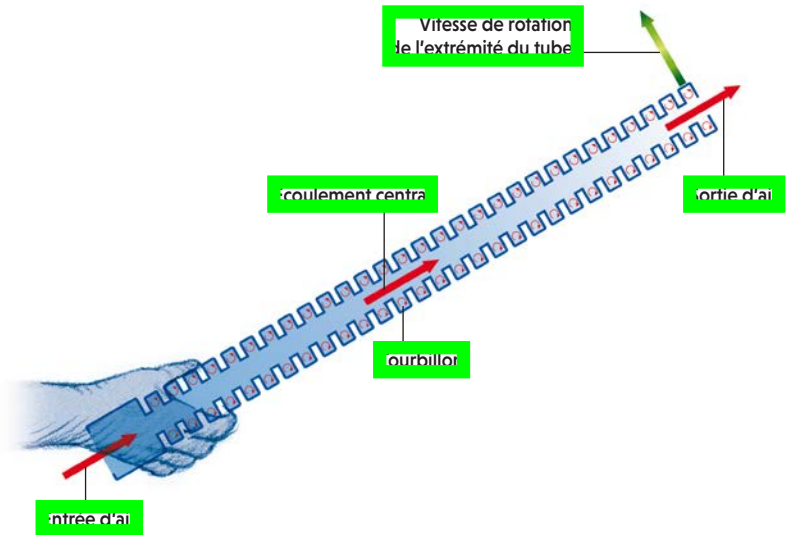
deux bouts : la période des ondes sonores est un sous-multiple ($1/n$, n étant un entier) du temps que met une perturbation acoustique pour effectuer un aller-retour dans le tuyau. Jusque-là, rien d'étonnant. Toutefois, une question se pose. Dans un clairon, le son a pour origine les vibrations des lèvres du musicien. Or ici, point de lèvres, ni d'anche comme pour la clarinette ou le hautbois, ni même de biseau comme pour la flûte. D'où vient alors le son ?

Expérimentons à nouveau. En regardant l'extrémité mobile du tuyau fendre l'air, on pourrait penser qu'il se produit à cet endroit un phénomène équivalent à celui qui permet de jouer une note en

CIRCULATIONS D'AIR

Dans un tube que l'on fait tourner rapidement, l'air intérieur est soumis à la force centrifuge. Il en résulte un écoulement d'air le long du tube, de l'extrémité tenue en main vers l'extrémité en rotation. Lorsque le tube comporte

périodiquement un tourbillon au niveau de chaque corrugation. Lorsque la fréquence d'émission des tourbillons coïncide avec l'une des fréquences de résonance du tube, un son intense de cette fréquence est produit.



Des sons musicaux peuvent être produits en faisant tourner les tubes en accordéon ou en percutant les tubes lisses.

soufflant perpendiculairement au tube d'une flûte de Pan ou à une bouteille. Mais ce n'est pas le cas: si l'on bouche avec le pouce l'extrémité du tuyau tenue en main, l'instrument devient muet.

En revanche, si l'on souffle dans une gaine électrique (aux parois en accordéon) de faible diamètre, un son est émis. La même expérience échoue avec un tube lisse: son diamètre est trop important pour que la bouche crée un écoulement d'air de vitesse suffisante. L'émission de son, qui disparaît par ailleurs avec un tuyau lisse, provient donc de l'effet conjugué des corrugations de la paroi et d'un écoulement d'air dans le tuyau.

Cette réponse suscite alors deux questions: pourquoi la rotation du tuyau provoque-t-elle un écoulement d'air dans celui-ci? Et pourquoi un écoulement d'air dans un tuyau corrugué engendre-t-il un son?

Répondons rapidement à la première question. L'air contenu dans le tuyau est soumis à une force centrifuge d'autant plus importante qu'il se trouve près de l'extrémité en mouvement. Or comme les deux extrémités du tuyau sont ouvertes et en contact avec de l'air à pression atmosphérique, l'air n'est pas retenu et se met donc en mouvement. Il s'établit un flux d'air continu, qui entre au niveau de

la main et sort par l'extrémité en mouvement rapide.

Un bilan complet à partir de l'équation de Bernoulli, loi bien connue de la mécanique des fluides, prédit que la vitesse d'écoulement (radiale) dans le tube est égale à la vitesse de son extrémité en rotation. Pour un son de 600 hertz (Hz), l'extrémité décrit des cercles d'environ 50 centimètres de rayon à raison de

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



6,2 tours par seconde, soit une vitesse d'un peu plus de 8 mètres par seconde.

Et l'origine du son? Suivons l'air dans son écoulement dans le tuyau. L'air de la section principale du tube frotte sur l'air quasi stagnant contenu dans les corrugations. Ce cisaillement entraîne l'émission périodique de tourbillons sur le bord de la corrugation. Lorsque leur fréquence d'émission coïncide avec une fréquence de résonance du tuyau, on a un fort couplage entre l'onde acoustique et l'écoulement aérodynamique, lequel lui fournit alors son énergie: un son puissant est produit.

Vérifions la plausibilité de cette hypothèse. Les corrugations de notre tuyau ont une période spatiale de 6,2 millimètres. Le temps que l'air met à parcourir cette distance est donc de l'ordre de 0,8 millièmes de seconde; il lui correspond ainsi une fréquence de 1230 Hz. Certes, c'est le double de la fréquence du son émis, mais cet écart s'explique parfaitement si l'on prend en compte les effets de viscosité, qui ralentissent l'écoulement près des parois.

EFFETS DE BOUT ET VITESSE DU SON

Cependant, l'histoire ne s'arrête pas là. Comparons la fréquence sonore (600 Hz) produite par notre tuyau avec ce que prédit la théorie. Pour un tube long de 76,5 centimètres et une vitesse du son dans l'air ambiant de 345 mètres par seconde (à 24 °C), on s'attend à une fréquence fondamentale de 225 Hz et à une deuxième fréquence harmonique à 675 Hz, plus aiguë que notre son à 600 Hz. La loi des tuyaux ne serait-elle vraie qu'à 10 % près?

Pas du tout, et les facteurs d'orgue le savent depuis longtemps. Dans la description des résonances acoustiques d'un tube ouvert, on suppose que la pression de l'air aux extrémités est strictement égale à la pression atmosphérique. Or c'est aussi à l'extrémité du tuyau que les vibrations de l'air sont maximales – et heureusement, car c'est cela qui permet au son de sortir du tuyau.

La couche d'air à l'extrémité du tuyau va et vient périodiquement et produit donc les ondes acoustiques, comme la membrane d'un haut-parleur. Autrement dit, l'air vibre aussi à l'extérieur du tuyau et ces vibrations sont notables dans une région de taille à peu près égale au rayon du tuyau. Pour un tuyau ouvert aux deux extrémités, tant que le diamètre du tuyau est petit devant la longueur d'onde, il faut ajouter à la longueur du tuyau une correction égale à 1,22 fois le rayon. Cette correction

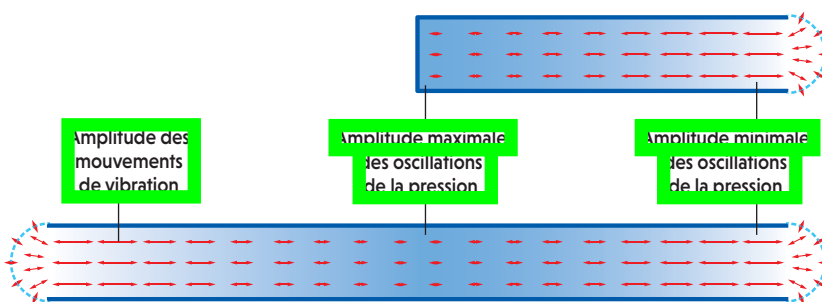
VIBRATIONS AU-DELA DES EXTREMITES

Dans le mode de vibration le plus simple de l'air contenu dans un tuyau fermé à l'une de ses extrémités, la longueur du tube est égale au quart de la longueur d'onde sonore. L'amplitude des oscillations de pression de l'air atteint son maximum au niveau de l'extrémité fermée et décroît jusqu'à l'extrémité ouverte.

Pour l'amplitude des mouvements de l'air, c'est le contraire.

Avec un tuyau ouvert à ses deux extrémités, le mode de vibration le plus simple (mais d'intensité trop faible pour être audible) est analogue, avec une configuration symétrique, et la longueur du tube correspond à une demi-longueur d'onde.

Cependant, dans les deux cas, l'air vibre aussi notablement dans une petite région délimitée (ici en pointille) de l'atmosphère libre, ce qui modifie la longueur effective des tubes à prendre en compte dans les calculs.



s'explique parfaitement la relation entre la note émise et longueur pour les «boomhackers», des tubes à percussion lisses destinés aux enfants.

Mais pour notre tube hurleur, elle ne suffit pas. Pourquoi? Les corrugations sont en cause. La propagation du son dans un milieu résulte de la conjugaison d'effets inertiels et élastiques. Plus un milieu est dense et plus il est compressible, plus la vitesse du son est faible. Comme les corrugations bloquent le mouvement de l'air qu'elles contiennent le long de l'axe du tube, cet air ne contribue pas à l'inertie. En revanche, il peut se comprimer radialement et contribue donc à l'élasticité. Les corrugations conduisent ainsi à une compressibilité effective plus importante, sans augmentation de l'inertie. Résultat: la vitesse de propagation du son y est plus faible que dans un tuyau lisse.

On montre plus précisément que la vitesse du son est plus basse d'un facteur égal à la racine carrée du quotient entre le volume total du tube (corrugations comprises) et le volume de sa section principale (sans corrugations). Pour notre tube hurleur, on obtient ainsi une estimation de la vitesse du son à 310 mètres par seconde.

Heureusement, pour jouer avec des tubes hurleurs, on n'a pas besoin de ces subtilités. Beaucoup de groupes en font désormais usage pour enrichir leurs interprétations sonores et profiter de leurs aspects colorés et décalés. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Rajavel et M. G. Prasad, *Acoustics of corrugated pipes : A review*, *Applied Mechanics Reviews*, vol. 65(5), article 050801, 2013.

M. P. Silverman et G. M. Cushman, *Voice of the dragon : The rotating corrugated resonator*, *European Journal of Physics*, vol. 10(4), pp. 298-304, 1989.

L. Levine et J. Schwinger, *On the radiation of sound from an unflanged circular pipe*, *Physical Review*, vol. 73(4), pp. 383-406, 1948.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

NOUVELLE
FORMULE



FORMULE
PASSION
-27%



FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE
INTÉGRALE
-41%



99€



79€



59€

BULLETIN D'ABONNEMENT

Envoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 17 rue de l'Industrie - BP 70 933 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN
JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

99€

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries

79€

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de *Pour la Science*

59€

INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Téléphone :

Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@

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

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire

N°

Date d'expiration :

(à compléter les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.

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 58.14

MAINTENANT



HERVE LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

LA FRONTIÈRE INVISIBLE DE L'ARCHIPEL MALAIS

Cacatoès à Sulawesi, trogons à Bornéo... Comment deux îles si proches peuvent-elles avoir des faunes endémiques si différentes? Quand en 1860, le naturaliste Alfred Wallace se penche sur cette question, il est loin d'imaginer qu'elle occupera les chercheurs jusqu'à aujourd'hui.

Comment expliquer la répartition des organismes vivants sur Terre? En science, des questions apparemment simples demandent parfois des études d'une grande difficulté. Cette question, en biogéographie, est de ce type. Curieusement, elle a émergé à l'époque moderne, à la différence de beaucoup d'autres déjà présentes dans des écrits grecs, romains ou arabes. Pourtant, dans le pourtour du bassin méditerranéen, on sait dès l'Antiquité que girafes, zèbres et éléphants ne se trouvent qu'en Afrique. On avait alors une réponse intuitive, *a priori* évidente: le climat! On trouvait normal que flores et faunes diffèrent sous des climats différents. Mais avec les Grandes découvertes, tout a changé.

Le naturaliste Buffon semble avoir été le premier, au XVIII^e siècle, à s'étonner que

des faunes totalement dissemblables peuplent l'Europe et l'Amérique du Nord, aux climats pourtant quasi identiques. Plus tard, en 1820, s'inspirant en particulier de l'explorateur Alexander von Humboldt après son voyage en Amérique du Sud (1799-1804) et du botaniste Robert Brown après sa campagne autour de l'Australie (1801-1803), le botaniste Augustin Pyramide de Candolle théorisa cette «loi de Buffon» en distinguant la *station* – la nature du lieu où chaque espèce a coutume de croître, essentiellement relative au climat et au terrain – de l'*habitation* – le pays où elle croît naturellement, d'un point de vue plus géographique et géologique. En d'autres termes, des causes différentes définissent une station et une habitation.

Généralisant ce concept, Candolle sépare le monde en vingt régions, distinguant de grands territoires (régions européenne, sibérienne, méditerranéenne) comme de petites contrées

Neuf sous-espèces de ce cacatoès ont répertoriées, toutes dans l'archipel indonésien, à Sulawesi ou dans les petites îles de la Sonde (à l'est de Bali).

La population compte moins de 7 000 individus et décline rapidement à cause du commerce de cette espèce et de la déforestation. Elle fait partie des espèces en danger critique d'extinction.



Petit cacatoès à huppe jaune
Cacatua sulphurea
Taille : 33 cm
Poids : 350 g



Trogon de Duvaucel
Harpactes duvaucelii
Taille : 24 cm
Poids : env. 40 g

EN CHIFFRES

60 %

des espèces d'oiseaux de l'archipel des Philippines ont disparu entre 2000 et 2005. Il n'y en reste plus que 500 environ.

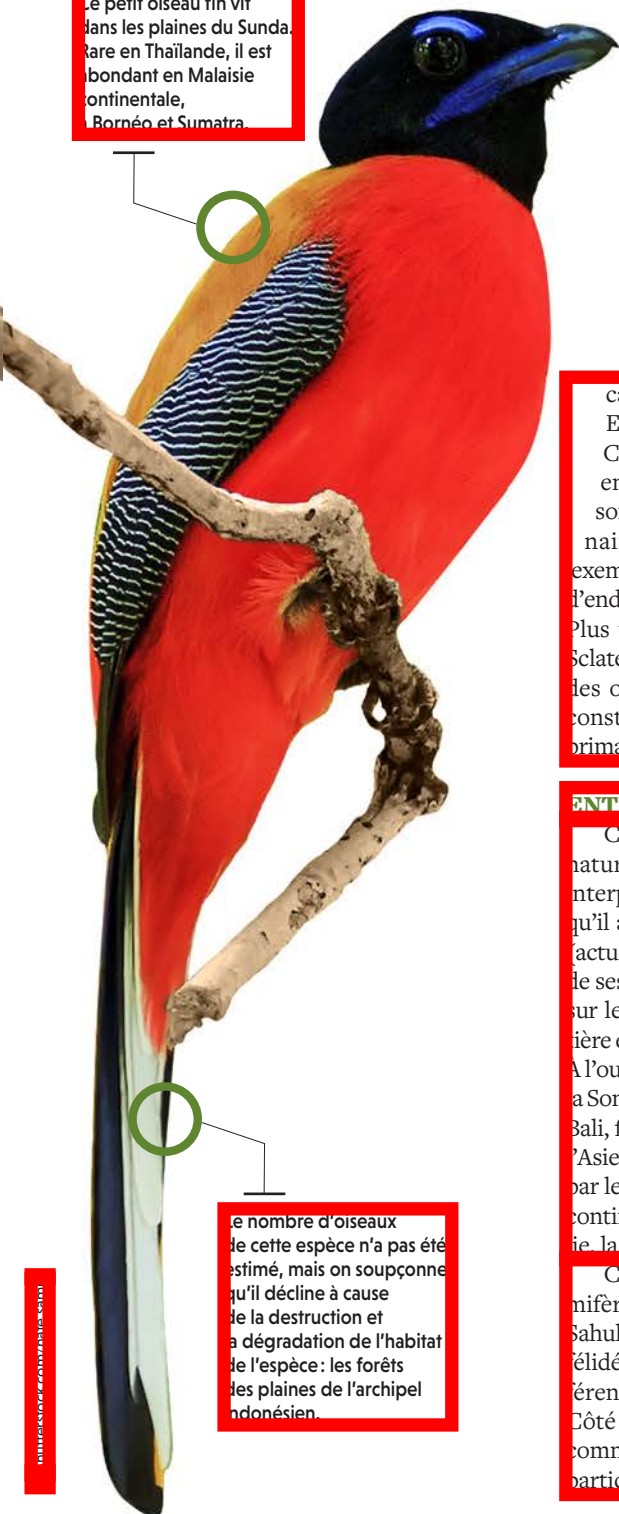
64 %

des 1/2 espèces de mammifères terrestres des Philippines sont endémiques, de même que 30 % des 572 espèces d'oiseaux de l'archipel.

11

grands domaines biogéographiques répertoriés en 2013 à partir de la distribution et des relations phylogénétiques de plus de 21 000 espèces d'amphibiens, d'oiseaux et de mammifères. Au XIX^e siècle, Alfred Wallace en avait distingué 6 en examinant les relations de parenté des espèces.

Le petit oiseau fin vit dans les plaines du Sunda. Rare en Thaïlande, il est abondant en Malaisie continentale, Bornéo et Sumatra.



Le nombre d'oiseaux de cette espèce n'a pas été estimé, mais on soupçonne qu'il décline à cause de la destruction et de la dégradation de l'habitat de l'espèce: les forêts des plaines de l'archipel indonésien.

caractéristiques (le cap de Bonne-Espérance, les Antilles, les îles Canaries...). Pour chacune, il se fonde en particulier sur les plantes qui lui sont exclusives – le genre *Cactus* originaire d'Amérique équatoriale, par exemple –, qu'il qualifie d'aborigènes ou d'endémiques – terme maintenant adopté. Plus tard, en 1858, l'ornithologue Philip Sclater se sert de la répartition mondiale des oiseaux pour distinguer six régions constituant «les divisions ontologiques primaires à la surface de la Terre».

ENTRE SUNDA ET SAHUL

C'est dans ce contexte qu'en 1860, le naturaliste britannique Alfred Wallace interprète les observations zoologiques qu'il a rassemblées dans l'archipel malais (actuellement indonésien). À la différence de ses prédécesseurs, il s'attache à définir, sur le terrain et avec précision, une frontière entre deux régions biogéographiques. À l'ouest de cet archipel, les grandes îles de la Sonde (Java, Sumatra, Bornéo), ainsi que Bali, font partie du plateau continental de l'Asie du Sud-Est, baptisé depuis le Sunda par les géologues. À l'est, un autre plateau continental, le Sahul, comprend l'Australie, la Tasmanie et la Nouvelle-Guinée.

Comparons les faunes. Chez les mammifères, les marsupiaux caractérisent le Sahul, tandis que le Sunda porte primates, élidés, insectivores et ruminants. La différence est aussi nette pour les oiseaux. Côté Sahul, on trouve: des perroquets, comme les loriquets et les cacatoès – en particulier le petit cacatoès à huppe jaune

(*Cacatua sulphurea*) –; des mégapodes; des méliphages comme les polochions (genre *Philemon*). Côté Sunda: des représentants des phasianidés, la famille qui comprend perdrix, cailles et faisans; les trogons, tel celui de Duvaucel (*Harpactes duvaucelii*); les minivets (genre *Pericrocotus*)...

Entre Sunda et Sahul, il y a une multitude d'îles, dont le chapelet des petites îles de la Sonde. Peut-on y trouver une séparation nette entre les deux régions biogéographiques? Wallace privilégie une ligne empruntant le détroit de Lombok, actuel passage principal du trafic maritime entre les océans Indien et Pacifique. Il prolonge cette frontière vers le nord, entre Bornéo et les Célèbes (actuellement Sulawesi). De part et d'autre de cette «ligne Wallace», selon le nom que le zoologiste britannique Thomas Huxley lui donne en 1868, Wallace trouve quelques rares contre-exemples, comme la civette palmiste commune (*Paradoxus hermaphroditus*) et le cerf rusa (*Rusa timorensis*), que l'on rencontre côté Sahul. Néanmoins, les différences sont telles qu'il écrit: «En quelques heures, on peut découvrir une quantité de différences zoologiques que nous donneraient seulement des semaines ou des mois de voyage dans n'importe quelle partie du monde.»

Wallace ne se contente pas d'une description, il cherche des explications et, pour ce faire, voyage. En 1858, sa quête de spécimens l'a conduit, conjointement à Charles Darwin, à proposer la sélection comme moteur de l'évolution. Certes, ses idées sont plus frustes que celles de son aîné, maturées pendant plus de vingt ans.

mais elles lui ont fourni une piste pour expliquer la dynamique de l'évolution.

Du côté de la géologie, Wallace insiste sur la variation du niveau des mers: certaines îles actuelles étaient peut-être autrefois reliées aux terres proches. Parallèlement, il tente de caractériser les forces susceptibles de faire émerger de nouvelles espèces, en proposant deux hypothèses *a priori* contradictoires.

Tout d'abord, la dispersion: des animaux peuvent migrer des continents aux îles, puis y devenir autonomes, évoluer et former de nouvelles espèces. La deuxième idée, connue aujourd'hui sous le nom de vicariance, est une application de sa «loi de Sarawak», rédigée sur l'île de ce nom et formulée ainsi en 1855: «Chaque espèce a pris naissance en coïncidence géographique et chronologique avec une autre espèce alliée préexistante.» Coïncidence géographique: l'aire de répartition de la nouvelle espèce est proche de celle de l'espèce dont elle s'est séparée. Coïncidence chronologique: suivant les temps géologiques, plus les fossiles sont récents, plus ils semblent apparentés aux formes actuelles.

En d'autres termes, avec la dispersion, les animaux migrent et vont faire souche ailleurs – la dynamique est plutôt du côté de la biologie; avec la vicariance, les animaux restent proches, mais des populations se trouvent isolées par des bouleversements environnementaux (formation de bras de mer, surrection de montagnes...) – la dynamique est plutôt du côté de la géologie. Pour Wallace, avec la variation du niveau des mers, de tels phénomènes se sont produits partout dans l'archipel malais sauf au détroit de Lombok, resté infranchissable.

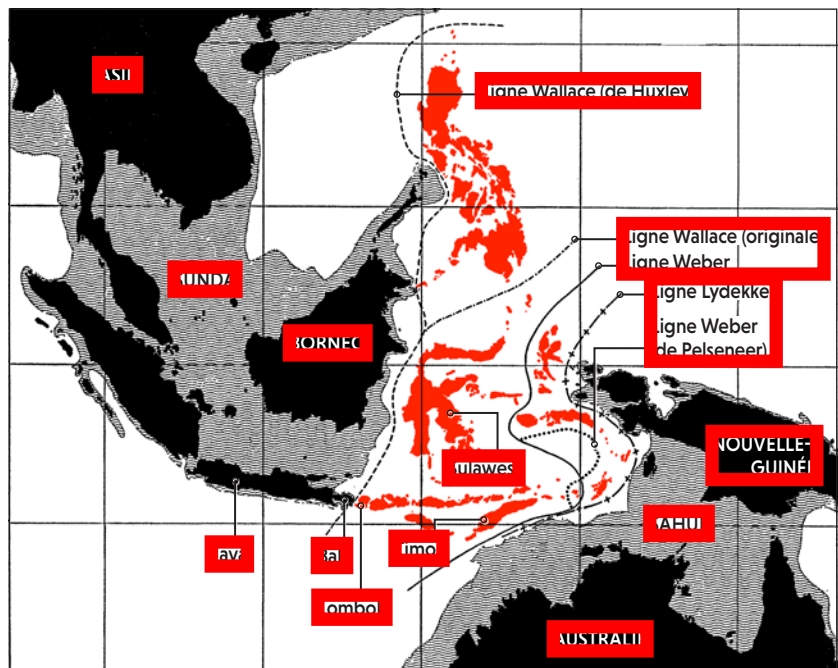
LA LIGNE... N'EN EST PAS UNE

Mais au fil des découvertes, tout se complique. D'autres tracés sont proposés pour délimiter les régions biogéographiques et, en 1928, est même émise l'idée qu'il ne s'agirait pas d'une ligne, mais d'une surface – la Wallacea – (voir l'encadré ci-dessus). Mais des découvertes récentes montrent que ce modèle est encore trop simple... La tectonique des plaques comme l'étude fine des faune et flore de la région ont confirmé que la séparation recherchée était bien une surface et non une ligne. Mais elles ont aussi révélé que la Wallacea est extraordinairement dynamique, étant à la rencontre de non pas deux, mais trois plaques: la plaque australienne (portant le Sahul) entre en collision avec la plaque eurasiennne (portant le Sunda) et la plaque philippine, au nord-est. La Wallacea est

DE LA LIGNE WALLACE A LA WALLACEA

Wallace ne connaissait que 20 espèces d'oiseaux dans l'archipel malais lorsqu'il traça sa ligne pour séparer ses deux régions biogéographiques. Par la suite, d'autres lignes furent dessinées, prenant en compte les nouvelles espèces découvertes. La ligne proposée par Max Weber est la plus récente.

Weber, que le Néerlandais Max Weber proposa à partir de nouvelles données sur les mammifères et les poissons d'eau douce recueillies de 1899 à 1900, était plus centrale, le même que sa variante, avancée par le Belge Paul Pelseneer. Mais en 1928, Roy Dickerson, du bureau de science des Philippines, rebattit les cartes: il ne fallait pas chercher une ligne, mais une surface, une région – la Wallacea (en rouge)...



donc à un point triple, d'une grande complexité géologique et, par conséquent, d'une grande hétérogénéité. Le scénario biologique s'est aussi complexifié: 15% de la flore et presque la moitié des vertébrés terrestres sont endémiques (125 espèces de mammifères, 262 espèces d'oiseaux, 99 espèces de squamates, 33 espèces de grenouilles...), sans compter les poissons d'eau douce et la faune marine. De plus, la faune et flore sont elles aussi hétérogènes, car on compte au moins neuf centres différents d'endémisme!

Que la ligne Wallace soit une frontière trop simple, on le comprend. Mais que la Wallacea le soit aussi, cela remet en question la définition d'une région biogéographique. En 2010, le biogéographe Bernard Michaux a proposé un nouveau concept, l'unité wallacéenne biogéographique: un espace qui présente à la fois une histoire géologique et un endémisme marqués. C'est en effet la coïncidence des dynamiques géologique et biologique qui devrait permettre de déterminer les régions biogéographiques élémentaires.

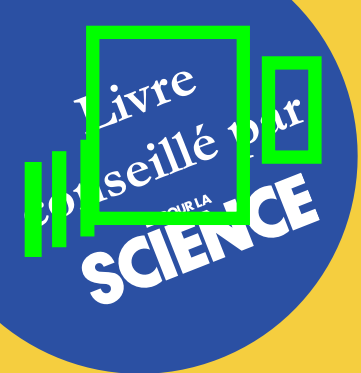
BIBLIOGRAPHIE

B. Michaux, *Biogeology of Wallacea: Geotectonic models, areas of endemism, and natural biogeographical units*, *Journ. Linn. Soc. London*, vol. 101, pp. 193-212, 2010.

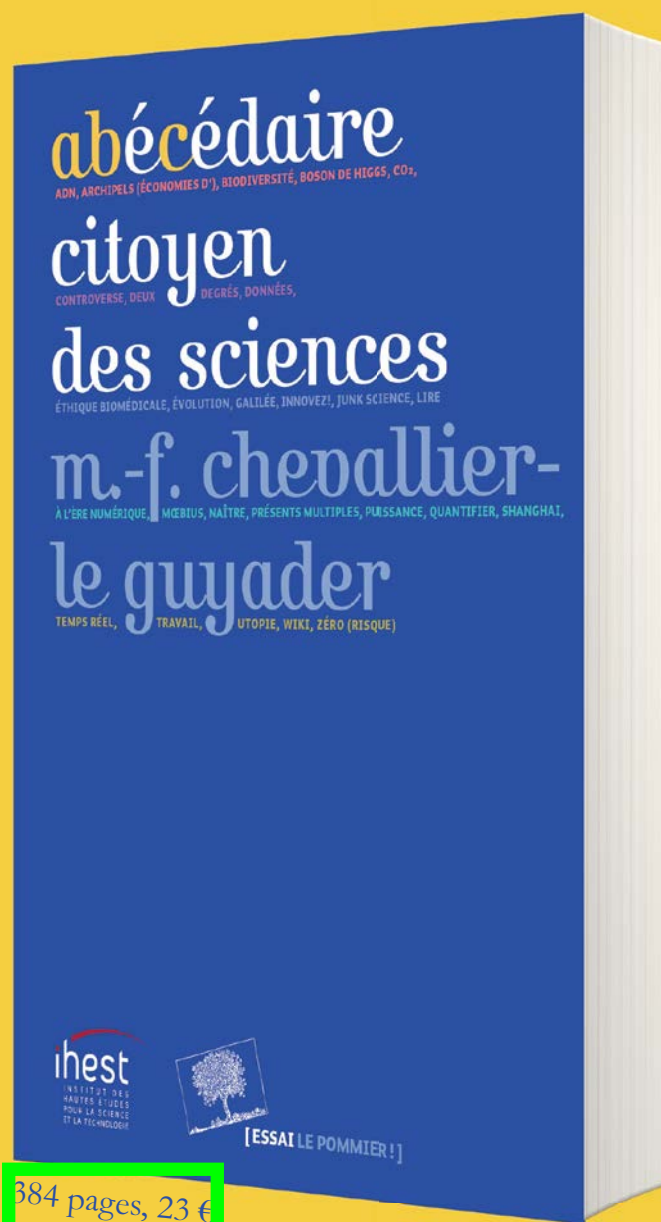
J. B. Cox, *The biogeographic regions reconsidered*, *Journal of Biogeography*, vol. 28, pp. 511-523, 2001.

E. Mayr, *Wallace's line in the light of recent zoogeographic studies*, *The Quarterly Review of Biology*, vol. 19(1), pp. 1-14, 1944.

A. R. Wallace, *On the zoological geography of the Malay archipelago*, *Journ. Linn. Soc. London*, vol. 4, pp. 172-184, 1860.



Partager les sciences : un enjeu de citoyenneté



De A comme ADN
à Z comme Zéro (risque),
en passant par Cyborg,
Évolution, ou Réalité virtuelle,
plongez au cœur des sciences
d'aujourd'hui !

*« Une stimulante invitation à la
réflexion sur cette interpénétration
entre science et société bien plus
complexe qu'il n'y paraît.
Et dont dépend en bonne partie
le devenir de nos démocraties. »*
Les Échos - mai 2017

En partenariat avec



Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site

www.editions-lepommier.fr



MAINTIEN



HERVE THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
agroParisTech-Inra à Paris

SPAGHETTIS DE PROTÉINES

En injectant, par de multiples coups de seringue, une solution de protéines thermocoagulantes dans un liquide chaud, on forme de fins cordons. Le cuisinier peut ensuite les utiliser à son gré.

Le thème du cinquième Concours international de cuisine note à note était «Consistances fibreuses et acidités»; les concurrents n'ont guère dépassé la dispersion de «fibres alimentaires» dans des masses ou

Les fibres alimentaires classiques sont essentiellement ces celluloses, hémicelluloses et pectines, dont est faite la paroi des cellules végétales. On les obtient chez soi en conservant les parties solides qui restent après l'utilisation d'un extracteur à jus ou d'une centrifugeuse de cuisine.

Le striage de couches? C'est ce que fait l'industrie du surimi quand elle étale en mince couche une pâte faite de poisson broyé, additionnée d'un empois d'amidon (comme une sauce blanche), d'huile, de blanc d'œuf, de sucre, de sel. En convoyant cette couche sous un peigne métallique, on obtient un feuillet strié, qui est ensuite cuit à la vapeur ou au micro-ondes. Puis la couche striée est roulée sur elle-même, avant de subir une coloration au paprika et l'ajout d'une composition odorante au goût de crabe.

Bien sûr, cela peut se reproduire facilement dans une cuisine. Il y a toutefois d'autres possibilités. Par exemple, l'utilisation d'une seringue pour injecter dans une solution d'alginate de sodium une autre solution, mais contenant des ions calcium, conduit à la formation d'un cordon un peu épais dont la peau gélifiée enferme la solution aux ions calcium. Celle-ci peut être tout aussi bien du jus d'orange que du lait, du thé, du café, du bouillon... Et l'on se souvient de la proposition, dans cette rubrique, des «fibrés», sortes de viandes artificielles: puisque la

Avec une seringue, on peut obtenir des fils de protéines, de forme analogue à ces capellini (mais plus courts).



viande est composée de fibres alignées, creuses, contenant une solution de protéines (les actines et les myosines, dans les viandes véritables), j'avais proposé de cuire des nouilles creuses, puis de les aligner verticalement dans un verre, avant de couler une solution de gélatine.

Cette fois, je vous invite à faire coaguler par la chaleur des solutions de protéines. Cela s'apparente au pochage d'un œuf, dont le blanc est une solution à 10 % de protéines thermocoagulantes. Surtout si l'eau a été acidifiée, par exemple par du vinaigre, le dépôt d'un œuf dans l'eau bouillante permet la coagulation immédiate de la surface du blanc d'œuf, ce qui emprisonne le jaune.

Evidemment, on obtiendra de meilleurs résultats en maîtrisant la coagulation, due à la formation de «ponts disulfures» entre atomes de soufre portés par des résidus de cystéine des protéines. Ce processus nécessite la dénaturation des protéines, c'est-à-dire le déroulement des pelotes moléculaires, ce qui expose les groupes portant les fameux atomes de soufre. Les dénaturations se produisent à des températures qui dépendent de la composition en résidus d'acides aminés des protéines. Pour le blanc d'œuf, les premières dénaturations surviennent vers 61 °C, mais il s'en produit à des températures supérieures: la température de

traitement détermine l'abondance des ponts disulfures, donc la force des œufs.

D'où l'idée d'utiliser une seringue pour injecter dans de l'eau bouillante non pas du blanc d'œuf insipide, mais une solution goûteuse où l'on a dissout des protéines (poudre de jaune d'œuf, ou protéines de pois, de féverole, de chanvre, etc. disponibles aujourd'hui en supermarché).

On obtient ainsi des fibres de protéines dont on fera ensuite usage. Ira-t-on jusqu'à les tisser? ■



MAINTIEN

- Dans 100 grammes d'un liquide goûteux (bouillon de viande corse, rumet de poisson, fond de légume, jus de fruit, café, vin...), dissoudre 20 % de protéines thermocoagulantes (par exemple les protéines de blanc d'œuf).
- Emplir une seringue de cette solution.
- Faire bouillir de l'eau ou une solution goûteuse, éventuellement acidifiée par du vinaigre cristallin.
- Injecter rapidement et plusieurs fois, en déplaçant la seringue, la solution protéique dans le liquide bouillant.
- Acheter de cuire pendant quelques dizaines de secondes.
- Récupérer les cordons de protéines et les écumoire et en faire un (bon) usage culinaire.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE

POUR LA
SCIENCE



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.26

EVERETT

Dans le monde étonnant de la physique quantique, comment expliquer que le résultat d'une expérience peut être, par exemple, «A» ou «B»? Selon l'interprétation proposée par Hugh Everett en 1957, à chaque mesure, le monde se dédouble: dans l'un, le résultat obtenu est «A», dans l'autre, c'est «B». Il existerait ainsi une infinité d'univers superposés, mais inaccessibles (hormis le nôtre)!

P.26

FOURMIS

La plus grande collection historique de fourmis du monde, à Genève, a été rassemblée à la fin du XIX^e siècle par Auguste Forel. Ce savant suisse a décrit plus de 3 500 espèces nouvelles pour l'époque.

P.24

«L'idée que nous nous faisons de nous-mêmes ou que les autres se font de nous n'est pas sans impact sur ce que nous devenons.»

GERALD BRONNER

l'Espresso

P.48

96%

C'est la proportion du temps que, en moyenne, les voitures passent sur une place de stationnement. Elles ne roulent donc qu'environ 1 heure par jour!

P.46

CAPO DI BOVE

Émise il y a 278 000 ans, cette coulée de lave a avancé en ligne droite sur plus de dix kilomètres jusqu'aux portes de Rome. Or la voie Appienne, une grande voie de l'Empire qui relie Rome à Naples, court le long de la crête de cette coulée. Un hasard? Non, les Romains ont utilisé la lave pour fabriquer les pavés de cette voie... et de nombreuses autres.

P.88

CORRUGATION

Le tuyau de votre aspirateur est «corrugué»: ses parois sont en accordéon, ce qui le rend plus souple... mais augmente ses vibrations au passage de l'air. Dans un aspirateur, ce n'est pas bien grave, mais dans les conduites de gaz des installations industrielles, leur ampleur est parfois telle qu'elles endommagent les structures alentour.

P.62

58

génération suffiraient à transformer un renard sauvage en animal domestique. Dès la 15^e génération, quelques renardeaux à la tête plus juvénile et à la queue plus touffue, voire aux oreilles pendantes, recherchent le contact humain en gémissant, remuant la queue et léchant à la façon d'un chien.

ACCELERATE

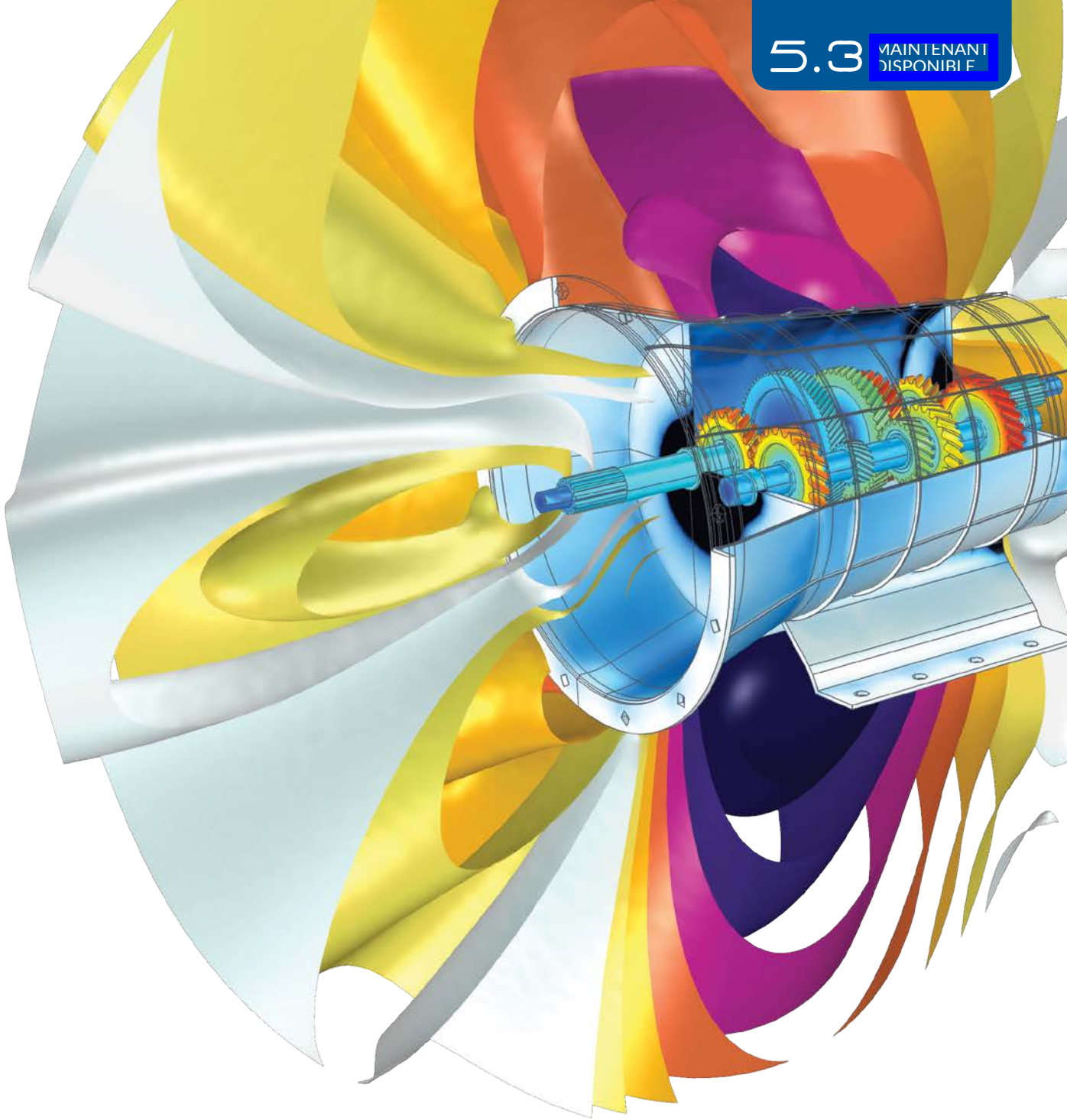


VOTRE APPLICATION À LA VITESSE SUPÉRIEURE CREATE FASTER CODE—FASTER

Améliorez les performances de votre application, notamment pour les **codes Python** et les applications de **machine learning**.

Intel® Parallel Studio XE 2017
EN SAVOIR PLUS SUR RITME.COM/INTEL

Ritme est un distributeur de **logiciels scientifiques**.
Nous vous accompagnons dans la réalisation de vos projets de **gestion et d'analyse de vos données** au travers de nos **formations** (outils, métiers, transverses) et de notre soutien technique et méthodologique.



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

comsol.fr/products