



POUR LA SCIENCE

POUR LA

Édition française de Scientific American

SCIENCE

MATHÉMATIQUES
DES FONCTIONS
PATHOLOGIQUES
MAIS UTILES

BIOLOGIE
LE GÉNOME,
UN FOUILLE
BIEN ORDONNÉ

ÉCONOMIE
JOSEPH STIGLITZ.
« LE PIB EST UN INDICATEUR
TRÈS INSUFFISANT »

NOVEMBRE 2020
N° 517

'Oumuamua, Borissov...

LES VISITEURS INTERSTELLAIRES

Enquête sur ces étranges objets
venus de mondes lointains



DUNE

LA SCIENCE DU
ROMAN CULTE

L 13256 - 517 - F: 6,90 € - RD



Que sais-je?

Une question à toutes les réponses



Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com



Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Charlotte Calament

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Charline Buché

Chef de produit: Eléna Delanne

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétaire général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilain

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Méry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

François Aguet, Patrick Bachélery,
Maud Bruguère, Thierry Gaude, Natacha Gillet,
Jean-Christophe Glaszmann, Fatima Mechta-Grigoriou,
Marco Mira d'Ercole, Franck Selsis, Frédéric Thomas,
Elena Toso, Martine Zaïda

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 00

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

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

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél. 03 67 07 98 17

Adresse postale:

Next2C - Service abonnements Pour La Science

26 bd du Président-Wilson

CS 4003267085

Strasbourg Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres; Stéphanie Trocard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réabonnement:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmuth

Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American» ou dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à Pour la Science S.A.R.L., 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 20%

Impact sur l'environnement: Impact

sur l'eau: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org

**É
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur en chef

DES TÉMOINS D'AUTRES MONDES

Le voyage vers des mondes lointains, au-delà du Système solaire, exerce une grande fascination mais reste un rêve inaccessible. Heureusement, les auteurs de science-fiction comme Frank Herbert avec son roman *Dune*, qui fait l'objet d'une nouvelle adaptation au cinéma, atténuent notre frustration: grâce à leur puissante imagination, ils nous font voyager virtuellement, tout en gardant une certaine vraisemblance scientifique, dans des univers peuplés de planètes, d'organismes et de civilisations étranges (voir pages 72 à 78).

Mais s'il nous est impossible de rendre visite physiquement à l'un des derniers domaines connus de l'univers, pourrions-ils pas venir à nous? C'est en quelque sorte ce qui s'est passé avec la découverte récente de deux corps célestes sortant de l'ordinaire et ayant pour noms 'Oumuamua et Borissov: leur vitesse, trop élevée, indique qu'ils ne sont pas originaires du Système solaire!

Alors d'où viennent-ils et quelle est leur nature? C'est à ces questions que tentent de répondre dans ce numéro les astronomes David Jewitt et Amaya Moro-Martín (voir pages 24 à 22). Une enquête qui fait le tour des hypothèses avancées à ce jour - y compris celle, peu plausible, affirmant que 'Oumuamua serait une fusée d'une civilisation extraterrestre...

Que des petits hommes verts ne soient pas à l'origine de ces visiteurs interstellaires, sans doute en provenance d'autres systèmes stellaires, ces objets portent en eux de précieuses informations sur le milieu où ils sont nés et sur la formation des planètes. Reste à collecter toutes ces informations - un grand défi étant donné la fugacité de ces visiteurs interstellaires. Mais avec l'abondance supposée de tels corps et le développement de nouveaux moyens pour les repérer, il est permis d'espérer que la frustration des astronomes n'aura qu'un temps. ■

SOMMAIRE

N° 517 /
Novembre 2020

ACTUALITÉS

P.6

ECHOS DES LABOS

- Un atlas de l'expression des gènes chez l'humain
- La fonte des calottes glaciaires réestimée
- Sous des volcans effusifs, un étonnant royaume
- Comment le pollen se fraye le bon chemin
- Flotter sous un liquide en lévitation
- Comment la lymphome protège les cellules cancéreuses
- Phosphine et vie sur Vénus
- Des traces de vie de 120 000 ans en Arabie
- Françoise Combes Médaille d'or du CNRS

P.18

LES LIVRES DU MOIS

P.20

HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

La souveraineté n'est pas une question de nation

Gilles Dowek

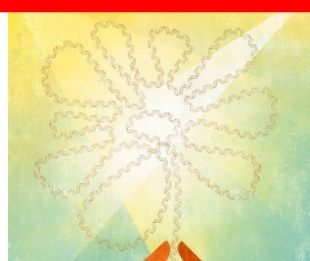
P.22

QUESTIONS DE CONSCIENCE

Du chercheur au youtubeur

Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



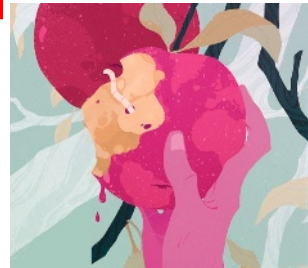
P.34

BIOLOGIE

LE GÉNOME, UN ÉQUILIBRE BIEN ORDONNÉ

Erez Lieberman Aiden

L'ADN de nos cellules est bien plus organisé dans l'espace qu'on ne le pensait. Il présente des domaines à différentes échelles et d'étonnantes boucles mouvantes...



P.56

ÉCONOMIE

PIB : UN INDICATEUR TRÈS INSUFFISANT

Joseph Stiglitz

À force de se focaliser sur un seul indicateur économique, le produit intérieur brut, ou PIB, de nombreux pays ont vu la santé et le bien-être de leurs habitants, ainsi que l'environnement, se détériorer. Par quoi faudrait-il compléter ce chiffre?



P.44

ANTHROPOLOGIE

LA SOCIABILITÉ, CLÉ DU SUCCÈS DE « SAPIENS »

Brian Hare et Vanessa Wood

Pourquoi *Homo sapiens* a-t-il surpassé les autres espèces humaines? Peut-être parce qu'un processus d'autodomestication a favorisé l'apparition, chez nos ancêtres et leurs descendants, d'une plus grande sociabilité.



P.64

HISTOIRE DES SCIENCES

LA MÉDECINE ENTRE ÉPIDÉMIES ET POLITIQUE... SOUS LA RÉVOLUTION

Jean-Luc Chappey

En 1789, les médecins se sont retrouvés au cœur de jeux de pouvoir visant à préserver la santé des populations sans pour autant entraver ni les nouvelles libertés, ni l'économie de guerre.



POUR LA
SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION

VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Abonnez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :

© Shutterstock.com/Zodar (fond),
ESQ/M. Kermasson (Quorum);
© 2020 Warner Bros. Entertainment
Inc. Tous droits réservés/Chiabla
James (Dune);
© Frédérique Plas/LERMA/CNRS
Photothèque (Françoise Combes)

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
d'abonnement *Pour la Science*,
jeté en cahier intérieur, sur tout
la diffusion kiosque en France
métropolitaine. Il comporte également
un courrier de réabonnement,
posé sur le magazine,
sur une sélection d'abonnés.



P. 72

SCIENCE & FICTION

LE DISTILLÉ DE «DUNE», RECYCLEUR ULTIME

Roland Lehoucq
et Jean-Sébastien Steyer

Dans la saga *Dune*, les habitants de la planète désertique Arrakis portent des «distilles», combinaisons qui recyclent l'eau de la transpiration, de l'urine... Un chapitre du nouveau livre *Dune - exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers* interroge le réalisme de ces dispositifs.



P. 24

ASTROPHYSIQUE

LES PREMIERS VISITEURS INTERSTELLAIRES

David Jewitt

Les astronomes ont récemment découvert dans le voisinage du Soleil des objets n'appartenant pas au Système solaire. Certes, ils avaient anticipé la présence de tels visiteurs venus de très loin. Mais les caractéristiques de l'un d'eux, nommé 'Oumuamua, intriguent les chercheurs.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

DES FONCTIONS MONSTRUEUSES MAIS UTILES

Jean-Paul Delahaye

En imaginant des fonctions bizarres, les mathématiciens mettent à l'épreuve leurs intuitions. Ces fonctions se révèlent aussi utiles pour modéliser des phénomènes naturels.

P. 86

ART & SCIENCE

Voir la confiance en peinture

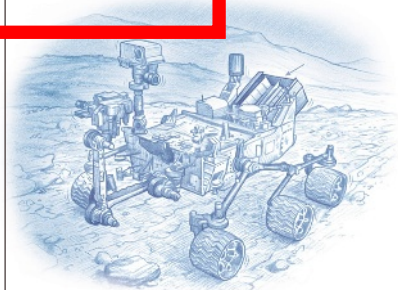
Loïc Mangin

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

De l'énergie nucléaire à petite échelle

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik



P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Ce que la phylogénie raconte des épidémies

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Du bleu métallique en cuisine

Hervé This

P. 98

À PICORER

COMMUNIQUÉ
PAGES I À IV (APRÈS P. 52)

L'intelligence artificielle au service

de la recherche scientifique

CRISPIS

ÉLECTRONIQUE EN RESEAU

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 *Homo sapiens informaticus*

P.22 Questions de confiance

UN ATLAS DE L'EXPRESSION DES GÈNES CHEZ L'HUMAIN

D'un individu à l'autre, le génome humain présente de multiples variations, dont on commence à cartographier les effets sur la régulation de l'expression des gènes.

Un consortium international a cartographié l'expression des gènes dans plus de 50 tissus du corps humain et mis en évidence l'ensemble de ses variations d'un individu à l'autre.

Séquencer le génome humain est une chose. Cartographier quels gènes sont exprimés dans quelles cellules de l'organisme, recenser les différences d'un individu à l'autre et repérer comment cette expression différentielle est orchestrée en son vivant, c'est tout autre. C'est pourtant le défi relevé par plusieurs projets internationaux d'envergure comme *Encode*, lancé en 2003 dans la continuité du séquençage du génome humain, le *Human Cell Atlas*, lancé en 2016, ou encore le projet *Genotype-Tissue Expression (GTEx)*.

Démarre en 2010 avec pour objectif d'établir un catalogue des effets des variations génétiques sur l'expression des gènes dans de nombreux tissus humains, ce dernier vient d'achever sa troisième et dernière phase.

Dès que l'on a su séquencer le génome humain, on a commencé à examiner les variations génétiques d'un individu à l'autre. Toutefois, on s'est vite aperçu que cartographier ces variations ne suffisait pas pour comprendre leur implication dans le fonctionnement de l'organisme et, notamment, leur influence sur le risque de développer des maladies.

D'autant que la plupart des variations concernaient des régions non codantes du génome, qui ne produisaient pas de protéines et intervenaient donc vraisemblablement dans la régulation de cette production. On s'est donc lancé dans l'analyse fonctionnelle du génome.

Une méthode consiste à partir en quête de séquences dont la variation d'un individu à l'autre expliquerait celle du profil d'expression d'un ou plusieurs gènes. Pour répertorier ces séquences régulatrices, nommées eQTL, on compare le profil d'expression des gènes chez plusieurs dizaines voire centaines d'individus et l'on recherche si des variations dans le génome sont associées à tel ou tel profil.

C'est ce que le consortium GTEx a fait pour chacun des 17 382 échantillons

de 54 tissus différents qu'il a prélevés post mortem sur 838 donneurs. Pour chaque échantillon, il a séquencé d'une part le génome, à la recherche de variations génétiques, et d'autre part le transcriptome, c'est-à-dire l'ensemble des ARN messagers produits (les intermédiaires de fabrication des protéines), dont il a repéré et quantifié chacun : plus un ARN messager était présent, plus le gène associé avait été exprimé. Le consortium a ainsi relié le niveau d'expression de quelque 20 000 gènes humains à des variations sur plusieurs millions de séquences – les fameux eQTL recherchés. Puis le consortium a commencé à exploiter cette base de données.

Dans une étude sur quelque 15 000 échantillons issus de 49 tissus, il a ainsi observé que l'expression de la quasi-totalité des gènes était associée à une ou plusieurs séquences eQTL. Dans une autre, il propose une méthode pour extraire des données la composition cellulaire des tissus et en déduire la régulation de l'expression des gènes spécifique à certains types de cellules. Dans une autre encore, le consortium a identifié des variants génétiques rares associés à un profil particulièrement anormal de l'expression des gènes, comme un variant d'APOE, un gène impliqué dans diverses maladies neurologiques. Il s'est aussi lancé dans l'exploration des différences liées au sexe : dans presque tous les tissus, il a observé des différences d'expression de gènes entre les hommes et les femmes. Plusieurs centaines à plusieurs milliers de gènes sont concernés selon les tissus, même si l'effet est léger.

Ces études ne sont que quelques exemples de l'horizon ouvert par cette base de données. Evidemment, elle a ses limites. Les donneurs sont pour la plupart des Américains d'origine européenne, les deux tiers sont des hommes et plus de la moitié des échantillons proviennent de personnes âgées de 50 ans et plus. Néanmoins, en accès libre, elle reste un outil précieux que de nombreuses équipes utilisent déjà pour y tester des hypothèses ou répondre à des questions précises, comme montrer que de telles données aideraient à prédire les effets secondaires d'un médicament lors d'un essai clinique. ■

MARIE-NEIGE GORDONNIER

The GTE Consortium, Science, vol. 369, Special section 2020

La fonte des calottes glaciaires réestimée

L'évolution de la cryosphère reste difficile à préciser.

Pour la deuxième fois, des glaciologues du monde entier font

le point dans une série d'articles sur ce que l'on peut dire aujourd'hui de la fonte des calottes groenlandaise et antarctique, qui représentent 99 % de la glace terrestre. Nicolas Jourdain, qui a participé à ces travaux, nous explique leur démarche.

Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER



NICOLAS JOURDAIN, glaciologue au Centre de l'Institut des géosciences de l'environnement, à Grenoble

La collaboration de glaciologues dont vous faites partie s'appelle-t-elle pour le GIEC, le Groupe d'expertise intergouvernemental sur l'évolution du climat ?

Pas directement. Nous inscrivons notre travail dans le cadre du projet d'intercomparaison des modèles d'initiation, connu en anglais sous le sigle ISMIP (Ice sheet model intercomparison project). Ulérieurement, le GIEC fera une analyse critique des prédictions de l'ISMIP.

Qu'est-ce qu'une intercomparaison ?

Les glaciologues modélisent les calottes polaires par diverses approches, qui sont différentes car nous ignorons encore beaucoup des processus intervenant à l'œuvre. Dans l'ISMIP, nous utilisons des approches multiples pour établir une fourchette de prédictions. Les chercheurs de deux grands laboratoires français de glaciologie – l'IGE à Grenoble et le LSCE près de Paris – ont contribué à plusieurs articles, dont deux synthétisant les prédictions pour 2100.

Quelles sont ces prédictions ?

Au Groenland, le comportement de la calotte dépend surtout du réchauffement de l'atmosphère et des émissions de gaz à effet de serre. Dans le scénario bas, celui où l'humanité parviendrait à faire des efforts drastiques de réduction d'émission d'ici à la fin du siècle, nous prévoyons une hausse du niveau marin due aux calottes groenlandaises comprise entre 1,5 et 4,5 centimètres ; dans le scénario haut, avec beaucoup d'émissions, nous arrivons à une élévation comprise entre 4 et 14 centimètres. Quant à la contribution de la calotte antarctique, elle dépend à la fois de l'accélération de l'écoulement des glaciers et des précipitations qui augmentent dans une atmosphère plus chaude, donc plus humide. Ces effets

contraints expliquent que la fourchette encadrant la contribution plausible de l'Antarctique à la hausse du niveau de la mer est large : de – 7,8 centimètres à + 30 centimètres d'ici à la fin du siècle !

Pourquoi une incertitude aussi grande ?

Parce que nous devons tenir compte de ce que nous ne comprenons pas bien : en Antarctique, les glaciers se prolongent sur la mer en y flottant. Exactement comme dans le cas d'un glaçon dans un verre d'eau, si elles fondent, ces parties flottantes ne font pas directement monter le niveau de la mer. Cependant, sans elles, l'écoulement des glaciers ne serait plus freiné, et plus de glace arriverait dans la mer. Nous ne savons pas bien quelle quantité, car nous ignorons à quelle vitesse les glaciers s'écouleraient si ces parties flottantes se réduisaient. Nous avons donc fait une expérience, qui est l'objet de l'un de nos articles : nous avons simulé dans nos modèles la disparition complète de parties flottantes, puis évalué l'élévation de l'océan mondial qui en résulterait. Cette hausse serait comprise entre 1 et 8 mètres au bout de 200 ans. Mais il ne s'agit là que d'un exercice de pensée, car les glaciers flottants ne vont pas disparaître du jour au lendemain.

La question de leur fonte est donc cruciale pour déterminer l'élévation de la mer.

Exactement. C'est pourquoi nous avons fait le point là-dessus dans l'un de nos articles. Le point crucial est la pénétration de l'eau océanique chaude sous les glaciers flottants. L'intercomparaison nous fait comprendre qu'une priorité est de préciser comment les parties flottantes des glaciers antarctiques fondent. Afin d'en savoir plus, plusieurs équipes internationales envoient sous la glace des robots instrumentés. Avec les résultats de leurs observations, on espère mieux comprendre la fonte des glaciers par l'océan. ■

The Cryosphere, numéro spécial, 21 septembre 2020 (<https://bit.ly/3n0tze1>)

GÉOSCIENCES

SOUS DES VOLCANS EFFUSIFS, UN ÉTONNANT MAGMA

Deux volcans effusifs des Galápagos recèlent dans leurs profondeurs un magma hétérogène, bien plus dangereux que la lave homogène qu'ils rejettent à la surface.

Tous les volcans ne sont pas de monstrueux cracheurs de laves violentes et destructrices telles que le furent autrefois le Vésuve ou le Krakatoa. Certains, comme le Kilauea, à Hawaï, ou le piton de la Fournaise, à la Réunion, sont plutôt des forces tranquilles aux flancs émaillés de rivières de lave basique. Celle-ci étant peu visqueuse et donc fluide, les gaz s'en échappent facilement, ce qui évite le caractère explosif des laves visqueuses. Elle s'écoule à une vitesse qui dépend de sa fluidité et du relief. Les éruptions de ce type, dites « effusives », présentent rarement un danger mortel pour les populations, même si elles peuvent occasionner de sérieux dégâts sur les infrastructures. Une équipe internationale de chercheurs, dirigée par Michael Stock, du Trinity College, à Dublin, s'est demandé pourquoi ces titans géologiques produisent uniquement des éruptions effusives depuis des millions d'années. Cette stabilité serait liée à une homogénéité du système magmatique sous-jacent. Or en étudiant la lave basaltique des volcans Wolf et Fernandina, des îles Galápagos, les chercheurs ont découvert que les entrailles de ces montagnes cachent une composition magmatique qui n'est pas si homogène et qui se rapproche de celle des volcans explosifs, bien plus dangereux.

Pour comprendre la cause de la monotonie éruptive de ces volcans, les chercheurs ont analysé la composition des cristaux présents, entre autres, dans la lave rejetée. Puis, à l'aide d'un modèle thermodynamique, ils ont déterminé la nature du milieu au sein duquel ces cristaux se sont formés, à savoir la composition des magmas stockés sous terre. Étonnamment, cette composition s'est révélée beaucoup plus hétérogène et variée que celle des laves basiques émises à la surface par Wolf et Fernandina. Elle se rapproche notamment de la composition du magma acide (et donc visqueux, ce qui les rend explosifs) rejeté par le volcan explosif Saint Helens, aux États-Unis, dont l'éruption de 1980 fit 57 morts.

Alors pourquoi ces géants des Galápagos demeurent-ils tranquilles ? Il se pourrait qu'on le doive à la proximité de ces volcans avec des



L'éruption en 2015 du volcan effusif Wolf, sur l'archipel des Galápagos.

« points chauds » de magma montant des profondeurs de la Terre jusqu'à la surface. La quantité de magma transitant par la structure géologique serait si élevée qu'elle « étoufferait » toute potentielle diversité chimique, ce qui expliquerait la composition homogène retrouvée lors des éruptions. Cette hypothèse reste à confirmer ; et, surtout, il faudrait s'assurer que cette conclusion se généralise à tous les volcans effusifs.

La découverte de ces magmas hétérogènes amène à se demander s'ils ne pourraient pas remonter un jour à la surface et provoquer une éruption explosive. Ces volcans étant restés stables pendant des millénaires, il semble peu probable que les choses changent subitement. Le véritable risque d'éruption explosive, concernant ces colosses multiséculaires, serait déterminé par la présence d'eau dans le système (on parle alors d'explosion hydromagmatique) ou par l'arrivée d'un magma riche en dioxyde de carbone. Iguanes, cormorans et tortues géantes peuvent donc encore dormir sur leurs deux oreilles. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

M. J. Stock et al., *Nature Communications*, vol. 11, article 3767, 2020.

MICROPLASTIQUES CONTRE HUITRES

À Tirremer, Kevin Lallec et ses collègues ont étudié l'impact des microplastiques sur la reproduction de l'huître la plus élevée, *Crassostrea gigas*. Ils ont mis en suspension du sperme d'huître dans de l'eau de mer chargée en billes de 50 nanomètres, susceptibles de se coller aux flagelles des spermatozoïdes. Résultat : le nombre de gamètes encore mobiles au bout d'une heure décroît fortement pour plus de 25 microgrammes de nanobilles par millilitre – une concentration supérieure d'un mois à celle de l'Atlantique. Alors, la reproduction des huîtres est affectée par les microplastiques... mais en laboratoire !

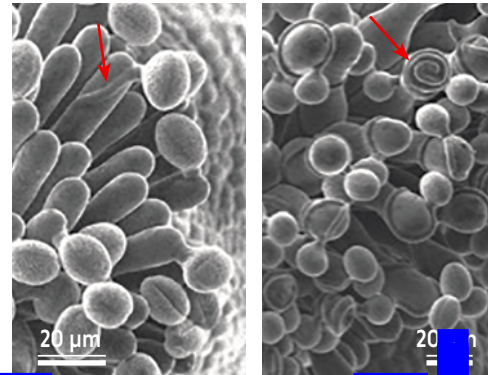
Nanotoxicology, 19 août 2020

COMMENT LE POLLEN SE FRAYE LE BON CHEMIN

La reproduction des plantes à fleurs implique une rencontre entre les gamètes mâles du pollen et les ovules enfouis dans le pistil de la fleur. Avec son équipe, Thierry Gaude, du Laboratoire de reproduction et développement des plantes, à l'École normale supérieure de Lyon, a découvert le rôle crucial que joue une enzyme, la katanine.

Le pistil porte à son sommet un stigmate formé de papilles, des cellules allongées qui ressemblent à des minitentacules d'anémone de mer. Quand un grain de pollen compatible y dépose, il y adhère, se réhydrate puis germe en formant un tube le long d'une papille, qui s'enfonce ensuite dans le pistil. C'est par ce tube que les gamètes mâles atteignent les ovules.

On avait peu d'indices sur les premières étapes de la croissance du tube pollinique. Or celui-ci s'oriente tout de suite dans la bonne direction, même lors d'essais en apesanteur. Thierry Gaude et ses collègues ont montré que



© Lucie Riglet

Les tubes polliniques (flèches) prennent une direction généralement rectiligne sur les papilles d'un stigmate d'une arabette des dames sauvage (à gauche), alors que leur croissance est désordonnée sur les papilles d'une plante mutante dépourvue de l'enzyme katanine (à droite).

les propriétés mécaniques des parois cellulaires des papilles du stigmate sont en jeu : il a été constaté que chez des mutants d'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) dépourvus de katanine, enzyme dont dépendent ces propriétés, les tubes polliniques croissent de façon désordonnée. ■

ISABELLE BELLIN

L. Riglet et al., *eLife*, vol. 9, article e57282, 2020

RENCONTRES

AUDITORIUM DE LA GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION, 1 DE JUIN À 20H

16 novembre | Les pierres précieuses se livrent !

Avec François Farges, minéralogiste au Muséum national d'Histoire naturelle et commissaire scientifique de l'exposition « Pierres précieuses »

30 novembre | Herbier joaillier, quand la nature inspire la création

Avec : Laurent Ballot, responsable de l'École de Botanique du Jardin des Plantes et Cécile Boccara, créatrice et directrice de la marque de joaillerie « Cécile Boccara »
Evelyne Possémé, conservatrice en chef du patrimoine au Département « Art Nouveau, Art Déco, Bijoux », Musée des arts décoratifs

CONFÉRENCES

AUDITORIUM VERNONNET, 1 DE JUIN À 20H

En partenariat avec L'École des Arts Joailliers
Avec François Farges, minéralogiste au Muséum national d'Histoire naturelle et commissaire scientifique de l'exposition « Pierres précieuses »

5 novembre | L'Art de Jean Vendôme

Avec Thierry Vendôme, joaillier-créateur de l'Art de Jean Vendôme

12 novembre | Roger Caillois, le rêveur de pierres

Avec Nicolas Bessy, président de l'École des Arts Joailliers

26 novembre | Jean-Baptiste Tavernier

Avec Cécile Logand, enseignante-chercheuse à l'École des Arts Joailliers

Sous réserve des conditions sanitaires en vigueur à cette période.



EN LIEN AVEC L'EXPOSITION PIERRES PRÉCIEUSES

Jardin des Plantes
Paris 5^e

Entrée libre et gratuite dans la limite des places disponibles

SCIENCE

PHYSIQUE

FLOTTER SOUS UN LIQUIDE EN LÉVITATION

«**P**as léger qu'un bouillon qui danse sur les flots» : le *Bateau ivre* d'Arthur Rimbaud a peut-être bien inspiré celui d'Emmanuel Fort et ses collègues de l'ESPCI, à Paris. En effet, leur bateau flotte la tête en bas à la surface inférieure d'un liquide en lévitation ! Pour réussir cette prouesse, les chercheurs ont soumis le récipient contenant un liquide visqueux à des vibrations verticales de haute fréquence. L'accélération liée aux oscillations crée une force moyenne qui contrecarre la pesanteur et empêche la formation de gouttes. Le liquide lévite au-dessus du fond du récipient.

Le phénomène n'est pas nouveau, même s'il n'avait jamais été réalisé à cette échelle. Mais ce qui a surtout intéressé les chercheurs de l'ESPCI, c'est la dynamique des objets : des bateaux de quelques grammes – posés sur la surface inférieure du liquide en lévitation. Les chercheurs ont précisé ce qui se passe en modélisant la situation.

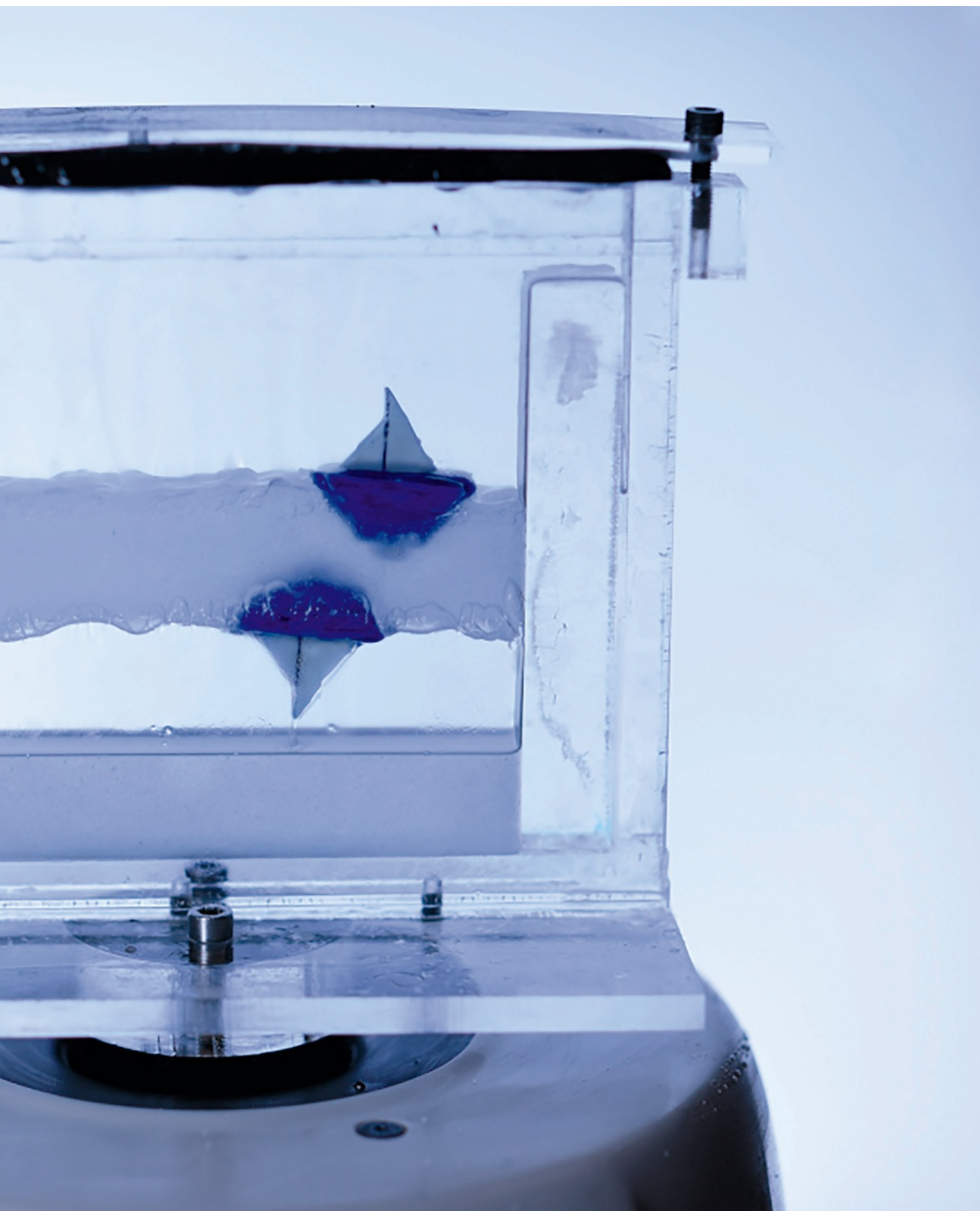
Dans le cas statique, sans l'accélération due aux vibrations, un bateau posé sur la surface inférieure est soumis à la pesanteur vers le bas et à la poussée d'Archimède vers le haut (car de bas en haut, la pression diminue), exactement comme un bateau posé sur la surface supérieure. La différence est que l'équilibre est stable sur la surface supérieure, mais instable sur la surface inférieure. Si l'objet posé en dessous s'écarte du point d'équilibre (instable), il tombe au fond du récipient ou remonte vers la surface supérieure. De façon contre-intuitive, la force liée aux vibrations a pour effet de stabiliser ce point d'équilibre. Résultat : les bateaux flottent aussi bien d'un côté du liquide en lévitation que de l'autre. Une expérience renversante ! ■

SEAN BAILLY

P. Apfel et al., *Nature*, vol. 585, pp. 69-72, 2020

© Benjamin Apffel | Institut Langevin





MÉDECINE

COMMENT LA LYMPHE PROTÈGE LES CELLULES CANCÉREUSES

Malgré son rôle clé de nettoyeuse, la lymphe favorise la dissémination

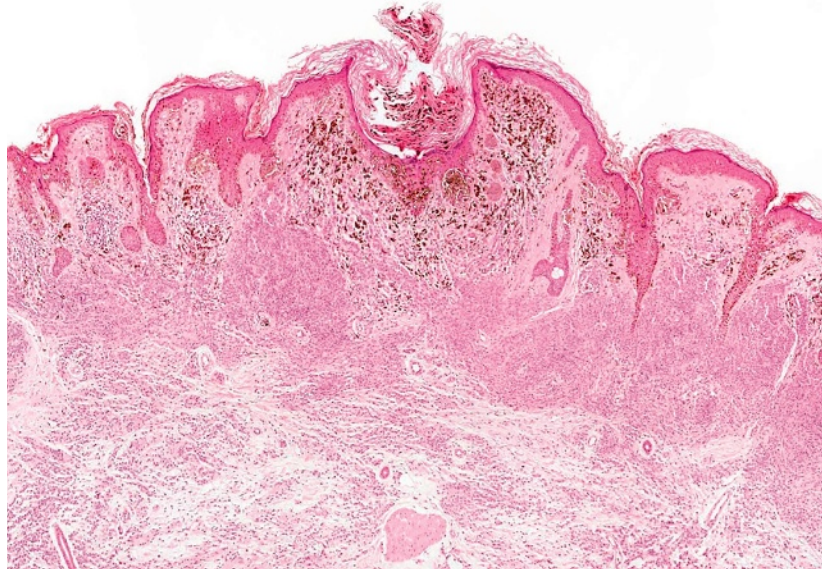
des cellules cancéreuses qui l'atteignent en les préservant de l'oxydation.

Lorsque des cellules cancéreuses se détachent d'une tumeur et circulent dans l'organisme, la plupart d'entre elles sont détruites. Toutefois, il arrive que certaines s'implantent dans d'autres régions de l'organisme et forment ainsi des métastases. Souvent, les premières métastases apparaissent dans des ganglions lymphatiques proches de la tumeur, avant d'écarter plus loin via la circulation sanguine. Si les oncologues connaissent ce phénomène depuis plusieurs années, ils ne comprenaient pas en quoi les ganglions lymphatiques facilitent l'implantation des métastases. Mais Jessalyn Ubellacker, du Centre médical du Sud-Ouest de l'université du Texas, à Dallas, et ses collègues viennent d'apporter une réponse: le passage par les ganglions protège les cellules cancéreuses.

Le corps compte plusieurs centaines de ganglions, répartis le long des vaisseaux du système lymphatique. Ce système régule le niveau d'hydratation des tissus du corps et évacue certains déchets cellulaires en drainant en permanence le liquide dans lequel baignent les cellules – la lymphe – vers d'autres organes, dont les ganglions. Ces organes sont à la fois des filtres mécaniques et des barrières immunitaires. C'est en effet l'endroit où les cellules immunitaires sont activées en y rencontrant des antigènes. Tout porte donc à penser qu'ils constituent un barrage contre les cellules cancéreuses. Pourquoi, alors, favorisent-ils les métastases?

Pour le savoir, Jessalyn Ubellacker et ses collègues ont comparé ce qui survient à des cellules cancéreuses issues de mélanomes humains quand on les injecte à des souris soit *via* des ganglions, soit dans le sang. Ils ont ainsi montré que les cellules injectées dans la lymphe subissaient un stress oxydatif moins fort que celles injectées dans le sang et qu'elles produisaient plus de métastases. Or le stress oxydatif est connu pour induire différents types de mort cellulaire. L'un de ces mécanismes était-il moins efficace dans les ganglions lymphatiques?

Le sang étant riche en fer, les chercheurs se sont intéressés en particulier à la ferroptose,



Quand des cellules cancéreuses issues d'un mélanome (ici sur une coupe histologique de repérage) traversent des ganglions lymphatiques, elles s'enrichissent en lipides qui les protègent de la destruction.

un mécanisme de mort cellulaire découvert il y a quelques années et qui nécessite du fer. De fait, ils ont montré que la ferroptose détruit bien les cellules cancéreuses directement injectées dans le sang: en présence d'un inhibiteur de la ferroptose, plus de métastases se développaient. En revanche, l'inhibiteur n'a eu aucun effet sur les cellules ayant transité par la lymphe, signe que la ferroptose n'agit pas sur elles.

Lors de la ferroptose, les lipides de la membrane des cellules sont oxydés. Mais la réaction n'est possible que si ces lipides sont insaturés, et plus les lipides sont insaturés, plus l'oxydation est grande. Or la lymphe, pauvre en fer, s'est révélée riche en acide oléique, un lipide peu insaturé. Celui-ci se retrouve enrichi dans la membrane des cellules cancéreuses et suffit à les protéger de la ferroptose. Pourquoi la lymphe est-elle enrichie en acide oléique? D'autres lipides interviennent-ils dans la protection des cellules cancéreuses? Ce mécanisme est-il propre au mélanome? Autant de questions auxquelles il s'agit à présent de répondre. ■

M.-N. C.

J. M. Ubellacker et al., *Nature*, vol. 585, pp. 113-118, 2020; R. M. Grüner et S.-M. Fendt, *ibid.*, pp. 36-37

LE CHANT DES OISEAUX S'ADAPTE

Durant le confinement du printemps 2020, le trafic routier a fortement diminué. Elizabeth Derryberry, de l'université du Tennessee, et ses collègues ont constaté que la pollution sonore dans la région de San Francisco a diminué et a atteint les niveaux des années 1950. Ils ont aussi noté que les oiseaux chantaient moins fort, les sons portant la même distance pour une énergie dépensée moindre. Un exemple d'adaptation rapide du comportement en réponse à de nouvelles conditions de vie.

Science, 24 septembre 2020

UNE NAINES BLANCHE AVEC UNE PLANÈTE

Dans cinq milliards d'années, le Soleil gonflera pour devenir une géante rouge. Il engloutira les planètes internes, puis deviendra une naine blanche. Des planètes peuvent-elles survivre à ce bouleversement ? Autour d'Andrew Vanderburg, de l'université du Texas à Austin, aux États-Unis, une équipe a détecté la première planète (une géante gazeuse) en orbite très rapprochée autour d'une naine blanche notée WD 1856+534. Reste à comprendre comment s'est formé ce duo improbable.

Nature, 16 septembre 2020

LA DOMESTICATION DU CAMEMBERT

Grâce à des séquences génétiques, Jeanne Rapp, de l'université Paris-Saclay, et ses collègues ont retracé l'histoire de la domestication du champignon *Penicillium camemberti*, qui donne la couche blanche du camembert. Elle est passée par une double sélection depuis une souche sauvage, en passant par *P. bifforme*, qui forme la moisissure bleu-vert des fromages frais de chèvre. Les champignons *P. camemberti* et *P. bifforme* présentent de nombreux avantages dans l'affinage des fromages.

Current Biology, 24 sept. 2020

LA MER A ENTRAÎNÉ LA RIZICULTURE

Apparue entre 11 500 et 6 200 avant notre ère dans le bassin du Yang-Tsé, la culture du riz s'est soudainement propagée vers le sud à partir de 3 000 ans avant notre ère. Pourquoi ? Avec des collègues, l'ingénieur T. Ma, de l'université Sun Yat-Sen, à Guangzhou, en Chine, vient de montrer que les rizières n'ont progressé vers l'Asie méridionale et du Sud-Est que lorsque des basses terres s'y sont constituées.

La stratégie des chercheurs était simple : mettre en évidence les anciens champs de riz grâce au pollen. Ils ont étudié les assemblages polliniques contenus dans 23 carottes de sédiments provenant de grands bassins fluviaux côtiers de Chine du sud, du Vietnam, du nord des Philippines, du Cambodge et de Thaïlande. Tandis que la présence ancienne de forêt se manifeste par une forte densité de pollens d'arbres, celle des champs se traduit par une haute densité de pollens de grains de riz.

Les assemblages de pollens trouvés au sein de chaque strate de sédiments témoignent de la présence de forêts antérieurement à 3 000 avant notre ère, et de l'installation de rizières



Une rizière sur des basses terres indonésiennes.

© Shutterstock.com/Nukeaf

champs après. Puis, entre 2700 et 2000 avant notre ère, la forêt a massivement disparu au profit des rizières. Or ces dates s'expliquent bien sachant que 4000 ans avant notre ère, l'océan mondial a cessé de monter ; l'accumulation des alluvions dans les estuaires et les deltas fluviaux a alors formé des basses terres... d'abord salines ; ce n'est donc qu'après un délai de désalinisation, à partir de 2500 avant notre ère, que les rizières se sont multipliées. L'océan a ainsi contrôlé l'expansion du riz. ■

F. S.

T. Ma et al., PNAS, en ligne le 14 septembre 2020

BIOLOGIE MARINE

PLUS DE NOURRITURE, PLUS DE TENTACULES

Le code génétique détermine le nombre de membres chez les vertébrés, chez les insectes... mais pas chez l'anémone de mer *Nematostella vectensis*. Aissam Ikmi, du Laboratoire européen de biologie moléculaire, à Heidelberg, et ses collègues ont voulu découvrir que le nombre de tentacules dont se dote ce cnidaire dépend de son alimentation. Ces chercheurs ont mis en évidence que, pourvu qu'elles obtiennent assez de nourriture, tant les anémones juvéniles que les adultes ont la faculté de faire croître de nouveaux tentacules. Un tel trait est plus proche de celui d'une plante que de celui d'un animal, souligne Aissam Ikmi. Une fois formés, les nouveaux tentacules sont indiscernables des autres. Ils poussent en des sites marqués par la présence de cellules musculaires, localisées



Nematostella vectensis est une anémone de mer mesurant quelques centimètres.

Elle est capable de faire croître des tentacules supplémentaires si la nourriture abonde.

L'expression du génome se modifie en réponse à l'arrivée de certains nutriments. Lesquels ? C'est ce qu'Aissam Ikmi et ses collègues cherchent maintenant à déterminer. ■

F. S.

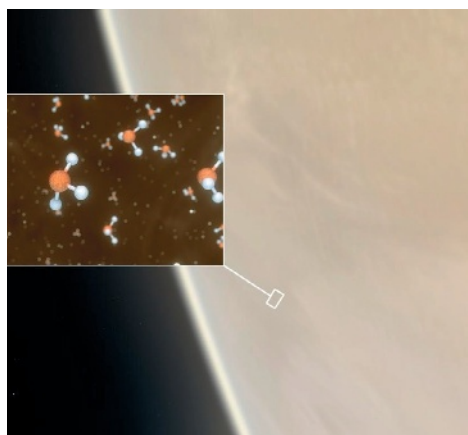
A. Ikmi et al., Nature Communications, vol. 11, article 4399, 2020

© Robert Aguilar/Smithsonian Environmental Research Center

ASTROPHYSIQUE

PHOSPHINE ET VIE SUR VÉNUS

La vie existe-t-elle ailleurs dans le Système solaire que sur Terre? La découverte récente de phosphine (PH₃) dans l'atmosphère de Vénus par Jane Greaves, de l'université de Cardiff, au Royaume-Uni, et ses collègues a relancé la question. Sa concentration mesurée serait d'environ 20 parties par milliard, une valeur faible mais non négligeable (1000 fois plus que sur Terre). Sur notre planète, la phosphine est synthétisée par des processus industriels, mais aussi par certains organismes anaérobies que l'on trouve, par exemple dans les rizières. Sur les planètes telluriques, on ne connaît pas de mécanismes de production abiotiques (non biologiques) efficaces de ce composé. Lequel serait par ailleurs rapidement détruit en réagissant avec l'oxygène, abondant sur ces planètes. Faut-il pour autant conclure que cette observation est un indice de vie? La réponse est non, d'autant plus que de nombreux aspects de la géochimie de Vénus sont mal connus. Enfin, ce signal de la



Vue d'artiste de la surface de Vénus, où de la phosphine aurait été détectée.

phosphine demanderait à être confirmée par d'autres observations tant il est faible. Au final, seule une mission *in situ* résoudra l'énigme de la phosphine; plusieurs projets sont d'ailleurs à l'étude. Il faudra cependant patienter encore quelques années et éviter d'ici là les conclusions trop précipitées. ■

S. B.

J. S. Greaves et al., *Nature Astronomy*, 14 septembre 2020

EN BREF

UNE LUMIÈRE BLANCHE, PURE ET STABLE

La teinte des sources de lumière blanche actuelles, telles que les LED, varie avec l'usure et la température – un inconvénient pour de nombreux métiers qui exigent une restitution fidèle des couleurs. Svetlana Eliseeva, du Centre de biophysique moléculaire, à Orléans, et ses collègues ont développé une nouvelle source plus fiable à base de dysprosium, élément dont l'atome a une structure électronique très stable et peu sensible aux conditions extérieures. Enchâssé dans une molécule en forme de couronne (métallacouronne), cet atome renforce la stabilité de la lumière émise par ce édifice. Et, en ajustant la structure de la couronne, il est possible d'obtenir un blanc pur.

J. Am. Chem. Soc., 10 septembre 2020

TEDx Saclay
x = independently organized TED event

Sylvie Retailleau, Présidente de l'Université Paris-Saclay

Cécile Villani, Lauréat de la médaille Fields de mathématiques et Député de l'Essonne

Gérard Mourou, Chercheur, lauréat du Prix Nobel de Physique 2018

Frédéric Rees, Chercheur à l'INRAE



26 novembre 2020

TERRE
NOTRE VAISSEAU

#tedxsaclay



PARIS
SACLAY
Communauté d'agglomération

NOKIA

BANQUE
POPULAIRE
VAL DE FRANCE

POUR LA
SCIENCE

i connecteurs
PARIS - SACLAY

DES STRUCTURES DE MÉTA-ADN

Il est possible d'assembler des brins d'ADN pour former des structures nanométriques. Mais au-delà, l'architecture des édifices obtenus était difficile à contrôler précisément. Guangbao Yao, de l'université Jiao-tong à Shanghai, et ses collègues ont surmonté cet obstacle et mis au point des «méta-ADN», des édifices supramoléculaires qui reproduisent à une échelle micrométrique la même organisation et les mêmes structures que l'ADN, dont ils sont totalement constitués. Ils ont réalisé diverses structures complexes (prismes, mailages, etc.). Ces microstructures pourraient trouver des applications en biologie ou en science des matériaux, par exemple en optoélectronique, en modifiant les propriétés optiques des surfaces sur lesquelles elles sont fixées. ■

MARTIN TIANO

G. Yao et al., *Nature Chemistry*, en ligne le 7 septembre 2020

DES TRACES DE PAS DE 120 000 ANS EN ARABIE



Ces traces de pas humains sont encore distinctes après 120 000 ans dans la boue.

SPERMATOZOÏDES GÉANTS DU CRÉTACÉ

La sexualité, cela distrait même un ostracode ! Il y a 100 millions d'années, un crustacé de 0,6 millimètre de long a dû tout juste de copuler quand une coulée de résine l'a submergé. Avec des collègues, Romaine Maréchal, Ph.D. de l'université de Würzburg-Maximilian à Munich, a nommé *Myanmarospermatozoides* cette espèce découverte dans un morceau d'ambre de Birmanie, et l'a étudiée. À l'aide d'un microscopie aux rayons X, les chercheurs y ont découvert des organes reproducteurs femelles parfaitement fossilisés et remplis de spermatozoïdes. Très grande pour une espèce aussi minuscule, la longueur (plus de 0,2 millimètre) de ces derniers illustre une stratégie de reproduction, comme notamment chez les drosophiles, consistant à produire un petit nombre de spermatozoïdes géants plutôt qu'un grand nombre de spermatozoïdes minuscules. Une stratégie apparue donc il y a fort longtemps. ■

R.S.

H. Wang et al., *Proc. R. Soc. B*, vol. 287, article 20201661, 2020

La péninsule Arabique était les terres les plus secs au monde. Mais, dans le passé, les incursions des moussons africaines ou indiennes au sud et l'extension au nord des précipitations méditerranéennes ont à plusieurs reprises transformé cette péninsule en une région de lacs et de savanes, que fréquentaient les mêmes faunes qu'en Afrique. Et *Homo sapiens* en faisait partie : avec des collègues, Matthew Stewart de l'institut Max-Planck d'écologie chimique à Jéna, en Allemagne, ont cherché à l'illustrer en datant de très anciennes traces de pas humains.

Les chercheurs ont découvert 376 empreintes animales dans la boue d'une péninsule Arabique. Elles illustrent un phénomène qui est banal dans la savane africaine : la concentration des herbivores (éléphants, buffles, ânes sauvages, gazelles...) autour des points d'eau pendant la saison sèche, et l'aubaine que cela constitue pour les prédateurs, nombreux à laisser des traces ; parmi eux, des humains.

Deux ou trois chasseurs se dirigeant ensemble vers le sud ont en effet laissé des traces de pas dans la boue. Les chercheurs, qui en ont retrouvé sept. Ils ont daté les strates les contenant par luminescence stimulée optiquement, une technique estimant la durée depuis laquelle un minéral – ici choisi dans les sédiments au plus près des empreintes – n'a plus été exposé au jour. La fourchette d'âges trouvée va de 112 000 à 120 000 ans avant le présent. Elle implique que le passage des chasseurs date du « stade isotopique marin 5 » (130 000 à 71 000 ans), un interglaciaire humide durant lequel nos ancêtres *sapiens* ont occupé la péninsule Arabique et abordé l'Eurasie. ■

R.S.

M. Stewart et al., *Science Advances*, vol. 6(38), article eaba8940, 2020

ASTROPHYSIQUE

FRANÇOISE COMBES MÉDAILLE D'OR 2020 DU CNRS

Le prestigieux prix récompense l'astronphysicienne Françoise Combes, spécialiste de la formation et de l'évolution des galaxies.

Professeuse au Collège de France, où elle occupe la chaire Galaxies et cosmologie depuis 2014, et membre de l'Académie des sciences depuis 2004, Françoise Combes est une figure mondialement reconnue de la recherche en astrophysique. La médaille d'or du CNRS honore ainsi une chercheuse au parcours exceptionnel. Avec ses travaux et ses nombreuses collaborations, elle a contribué à de

nombreuses découvertes. Son champ d'expertise est particulièrement vaste : de la formation et l'évolution des galaxies à la matière noire en passant par les techniques d'observation des quasars.

Françoise Combes a aussi participé activement à la diffusion des idées et du savoir aussi bien par ses activités d'enseignement que par ses nombreux livres, articles et conférences à destination du

grand public. À l'occasion de l'attribution de la médaille d'or du CNRS, nous lui avons demandé de partager avec nous sa vision d'ensemble sur son domaine de recherche. Elle souligne à quel point la période que nous vivons est palpitante : de nombreuses grandes découvertes ont marqué l'astrophysique ces dernières années et d'ambitieux projets d'observation augurent d'un avenir proche non moins fécond.

Quelles découvertes récentes vous ont-elles particulièrement marquée ?

Depuis vingt ans environ, on constate une accélération des découvertes en astrophysique et en cosmologie. Elles sont surtout observationnelles grâce à la mise en service d'instruments très performants, comme le télescope spatial *Hubble*, qui est opérationnel depuis 1990, mais il est loin d'être le seul.

L'une des grandes découvertes est sans conteste la détection des planètes extrasolaires. En 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'université de Genève, ont découvert la première planète autour d'une étoile de type solaire. Aujourd'hui, notamment grâce au télescope spatial *Kepler*, on en connaît plusieurs milliers. Par ailleurs, en 1998, deux équipes de cosmologistes ont mis en évidence l'accélération de l'expansion de l'Univers en étudiant de lointains supernovæ, des explosions très brillantes d'étoiles en fin de vie. Et, plus récemment, en 2015, la collaboration *Ligo-Virgo* a confirmé l'une des prédictions de la théorie de la relativité générale : les ondes gravitationnelles, c'est-à-dire des vibrations de l'espace-temps. Grâce à des interféromètres gigantesques, on a détecté ces ondes émises lors de la fusion de deux trous noirs.

Ces quelques exemples s'accompagnent de beaucoup d'autres avancées aussi bien observées que théoriques en cosmologie et dans le domaine de la physique des galaxies.

Vous occupez la chaire Galaxies et cosmologie au Collège de France.

Quels domaines de recherche ont longtemps été vus comme indépendants. Connaissent-ils maintenant un rapprochement ?

Depuis une quinzaine d'années, les chercheurs se sont aperçus qu'on ne peut comprendre l'évolution des galaxies qu'en prenant en compte de vastes structures de matière, les filaments, qui s'étendent sur de grandes échelles cosmologiques. Une étape cruciale a été le démarrage en 2000 du programme de relevé *SDSS* (*Sloan digital sky survey*), qui a identifié des millions de galaxies. Nous avons alors constaté qu'il existe deux familles bien marquées : les galaxies bleues où se forment de nouvelles étoiles et les rouges, qui ne contiennent que de vieilles étoiles. Il n'y a pas de stade intermédiaire, mais une galaxie peut passer d'une famille à l'autre de façon cyclique en fonction de la quantité de gaz qu'elle contient. Les simulations numériques nous ont permis de comprendre que les filaments apportent le gaz et que le trou noir supermassif au centre de la galaxie a un effet régulateur : il devient très actif quand il est alimenté en matière et, par réaction, repousse le gaz hors de la galaxie.

On ne peut pas comprendre l'évolution des galaxies sans prendre en considération leur environnement, aux échelles les plus vastes. Et, inversement, dans l'histoire de l'Univers, les galaxies





ont joué un rôle crucial, notamment pendant la période de réionisation. Vers

200 millions d'années après le Big Bang, elles ont contribué à ioniser et chauffer le gaz qui remplissait l'Univers. Mais cette période reste encore assez mal connue. Les chercheurs attendent beaucoup du futur télescope spatial *James-Webb (JWST)*, le successeur de *Hubble*, prévu pour 2021. Alors que *Hubble* ne voit que les galaxies primordiales les plus brillantes, et avec une résolution limitée, *JWST* devrait en voir beaucoup plus et plus finement. D'autres projets, comme le radiotélescope *SKA*, étudieront grâce à la lumière de quasars lointains (des galaxies contenant le trou noir supermassif central est très actif) l'évolution du gaz dans l'Univers.

Quels ont été les progrès

en cosmologie ?

Les observations les plus récentes, comme la carte du fond diffus cosmologique (le rayonnement émis par l'Univers 380 000 ans après le Big Bang) dressée par le satellite *Planck* avec une précision exceptionnelle, ont consolidé notre confiance dans le modèle du Big Bang, qui décrit un univers né d'un état de densité et de température extrêmes et qui se refroidit au cours de son expansion.

Il y a cependant encore beaucoup d'inconnues dans ce modèle.

En particulier, par exemple, en une fraction de seconde, l'univers aurait gonflé d'un facteur 1030. Cette phase explique de nombreuses observations mais le mécanisme sous-jacent n'est pas élucidé. Les théoriciens ont proposé beaucoup de scénarios. Pour faire le ménage, une piste serait de détecter des ondes gravitationnelles primordiales produites pendant l'inflation. Elles auraient laissé une empreinte dans le fond diffus cosmologique, signal qui n'a pas encore été détecté. Une autre piste serait d'utiliser un réseau de pulsars (des étoiles à neutrons émettant un signal périodique très régulier) dans la Voie lactée pour déceler le passage de ces ondes gravitationnelles.

Qu'en est-il de l'énergie noire et de la matière noire ?

L'énergie noire représente 70 % du contenu de l'Univers ; elle explique l'accélération de l'expansion de l'Univers, mais sa nature reste inconnue. Comme pour l'inflation, les théoriciens ont proposé de très nombreuses explications. Si des observations ont déjà permis d'écarter certaines d'entre elles, les données actuelles ne sont pas assez précises pour dire si l'énergie noire est juste une constante cosmologique ou quelque chose de dynamique qui évolue au cours du temps. Le télescope spatial *Euclid*, prévu pour 2022, devrait recenser la position de 12 milliards de galaxies à différentes époques. L'analyse de ces données permettra de retracer la dynamique d'expansion de l'Univers avec assez de précision pour en savoir plus sur la nature de l'énergie noire.

Le reste du contenu de l'Univers se partage entre 5 % pour la matière baryonique (composée des atomes) et 25 % pour la matière noire. Cette dernière intervient à de nombreuses échelles, tant pour expliquer la dynamique des galaxies que pour interpréter les données du fond diffus cosmologique. On a longtemps pensé qu'une particule massive nommée « *wimp* » (pour *weakly interacting massive particle*) était le bon candidat. Mais sa non-détection au *LHC*, le grand collisionneur de hadrons du Cern, près de Genève, et dans d'autres expériences utilisant des approches très différentes amène à penser que le *wimp* n'est pas la bonne piste. Il faut regarder du côté des autres candidats, et ils sont nombreux : nouvelles particules exotiques, trous noirs primordiaux, gravité modifiée...

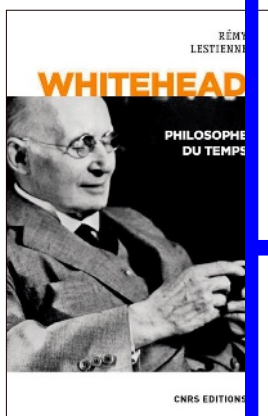
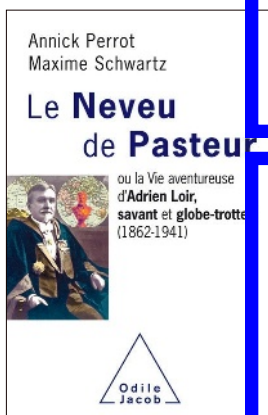
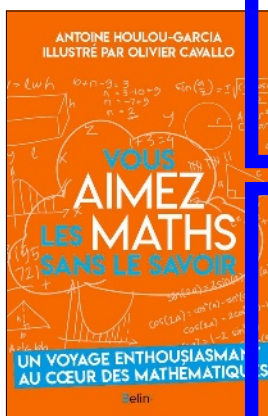
Que vous inspirent tous ces résultats et ces projets futurs ?

Je pense que nous sommes à un tournant. Les dernières décennies ont fait l'objet de découvertes incroyables. Il reste encore de grandes questions, mais de nouveaux instruments, très puissants, scrutent déjà le ciel ou le feront bientôt. Nous avons beaucoup de chance de vivre à cette époque, parce que, j'en suis sûre, plusieurs des énigmes de l'Univers seront prochainement éclaircies. ■

Propos recueillis par SEAN BULLY

BIOLOGIE

MATHÉMATIQUES



L'IMMORTALITÉ BIOLOGIQUE

Hélène Merle-Béral

Odile Jacob, 2020,
180 pages, 20,90 euros

La mort des animaux conscients a rendu notre mort insupportable, de sorte que les humains ont inventé les dieux et les promesses de vie éternelle dans l'au-delà. Mais voilà que des avancées scientifiques ont ouvert la possibilité de flirter avec l'éternité – non pas la vie éternelle sur Terre ! – mais une forme d'« immortalité », comme écrit l'autrice dans son passionnant livre.

Celui-ci s'articule en trois parties. Hélène Merle-Béral passe d'abord en revue les principales croyances inventées par les hommes dans leur obsession d'échapper à la mort. Elle nous explique ensuite les multiples raisons biologiques du vieillissement des êtres vivants. On comprend alors qu'en théorie, des recherches scientifiques pourraient livrer des moyens de stopper, voire d'inverser les processus qui nous font vieillir. Puis l'autrice décrit l'univers transhumaniste.

Non seulement Hélène Merle-Béral nous dresse un panorama exhaustif des outils déjà à disposition ou en cours d'élaboration (décryptage des génomes, ciseaux à ADN, nanotechnologie, cellules souches, intelligence artificielle, prothèses en tous genres, robotisation, fabrication d'organes en 3D, exosquelette, biocapteurs...), mais elle nous explique aussi qui fait quoi et où actuellement parmi les différents laboratoires de la planète. Enfin, elle évoque plusieurs des conséquences sociétales qui découleront de ce nouveau monde, comme la coexistence transitoire des humains augmentés et normaux, la fin des religions ou encore le nouveau rôle des médecins dans la société.

Deux critiques : il manque un développement sur le pourquoi de la sénescence, thème puissant dans les sciences de l'évolution ; pas de discussion non plus du désastre écologique que signifierait l'accès à l'immortalité. Les rêves transhumanistes de colonisation d'exoplanètes en tiennent-ils compte ? Il vaudrait mieux

VOUS AIMEZ LES MATHS SANS LE SAVOIR

Antoine Houlou-Garcia

Belin, 2020,
144 pages, 18,00 euros

Ce livre est un recueil d'historiettes de portée initiatrice relatives à des résultats mathématiques généralement étonnants, donc prenants. Elles illustrent l'élégance des mathématiques, mais plus encore la beauté inattendue du cheminement logique. Si les sujets traités (tours de cartes, votes, géométrie, jeux de nombres...), ne sont pas tous inédits, l'angle de résolution des questions posées est original et autorise une réflexion parallèle. Exemple : le jeu avec deux dés est plus intéressant qu'avec un seul, car la somme des deux dés lancés n'est pas de probabilité uniforme et le résultat le plus fréquent est 7. Au Monopoly, il faut ainsi construire des maisons à une distance de 7 cases des adversaires dont c'est le tour de jouer. Qui utilise cette réflexion lors d'une partie ? Les mathématiques s'appliquent dans des situations imprévues et nous y penserons si nous gagnons en confiance dans nos possibilités de réflexion.

Quoiqu'il soit absurde de prétendre que le monde est mathématique (le calcul de la trajectoire des planètes n'explique pas la nature de celles-ci), il est vrai que certains de ses aspects sont dévoilés par les mathématiques. Au prix d'un effort, car le « bon sens », prôné actuellement dans certains cercles antiscientifiques, est souvent démenti par la logique. C'est en cela que la promenade dans l'histoire de la réflexion mathématique retrace dans l'ouvrage est à la fois une leçon d'humilité et d'espoir.

De surcroît, les mathématiques, assimilées à un art, sont mises en relation dans les histoires du livre avec des considérations sur le dessin (voir le cas de la fougère fractale), la musique, la biologie, la philosophie...

Pour persuader de l'intérêt des aspects complexes des mathématiques, ne faut-il pas donner envie de les apprendre sur des situations simples qui en dévoilent l'essence ? Le livre y réussit à merveille.

PHILIPPE BOUANGER
FONDATEUR DE POUR LA SCIENCE

FRÉDÉRIC THOMAS
LABORATOIRE MIVEGEC, CNRS, MONTPELLIER

LE NEVEU DE PASTEUR

Annick Perrot et Maxime Schwartz

Odile Jacob, 2020
320 pages, 24,90 euros

Tout le monde connaît les Pastoriens, la tribu scientifique représentée par un institut de renommée internationale descendant de notre savant national Louis Pasteur. Peu de gens savent toutefois que, n'ayant pas de fils médecins, Pasteur forma son neveu Adrien Loir pour l'assister au laboratoire et l'envoyer en mission de par le monde ébauchant un réseau d'instituts Pasteur. Pourquoi a-t-on oublié cet héritier potentiel de la tradition pastoriennne? Les auteurs se sont posé cette question à laquelle ils répondent sur la base de nombreux documents inédits. Il en ressort que la trajectoire de cet esprit non conformiste et curieux de tout fut parfois tragique.

À Tunis, où il créa un institut Pasteur en 1892 (toujours actif), il alla en la malchance d'être éclipé par son successeur Charles Nicolle, futur Prix Nobel, alors qu'à son arrivée il avait donné l'exemple d'une recherche attentive aux problèmes locaux et nouée d'amitié avec le premier médecin tunisien formé en France, Béchir Dinguizli. Adrien Loir a aussi écrit, à la fin de sa vie, des mémoires intitulés *À l'ombre de Pasteur*, un témoignage de première main longtemps mis sous le boisseau, en raison de ce qui suggérerait d'irrégularités dans la démarche pastoriennne. Le livre d'Annick Perrot et Maxime Schwartz présente une réhabilitation bienvenue avec des récits passionnants sur la vie dans des pays contrastés comme l'Afrique du Sud, l'Australie et le Canada. Adrien Loir est bien un pastorien différent, à certains égards plus proche de nous que les personnages officiels de sa génération.

À lire comme un vrai roman par temps de Covid-19, à propos d'un observateur avisé des multiples facteurs y compris socioculturels, intervenant dans les maladies humaines et animales, bref à propos de ce que l'on peut appeler un pionnier de l'épidémiologie de terrain et de la santé globale.

ANNE-MARIE MAULIN
LABORATOIRE SPHERE, UNIVERSITÉ DE PARIS**WHITEHEAD, PHILOSOPHE DU TEMPS**Rémy Lestienne
CNRS Éditions, 2020,
224 pages, 25 euros

Physicien et philosophe des sciences, Rémy Lestienne propose ici une synthèse des travaux d'Alfred North Whitehead (1861-1947), mathématicien, ingénieur et philosophe anglais toujours influent sur nombre de courants de pensée actuels. L'auteur a parsemé son texte de commentaires par lesquels il laisse transparaître ses propres idées; il poursuit ainsi la démarche entamée par ses ouvrages précédents sur les sujets les plus fondamentaux comme le temps, l'instant, la conscience, les neurosciences, l'intrication quantique.

Whitehead, esprit éclairé et très doué, professeur puis ami de Bertrand Russell, avant eu des charges prestigieuses à Oxford, Cambridge, Londres et Harvard, est devenu l'un des grands philosophes de la première partie du ^{xx}e siècle. L'auteur en présente la biographie avant d'analyser et commenter ses écrits.

Une caractéristique des travaux de Whitehead est d'avoir mêlé mathématiques, relativité, physique quantique à la philosophie. Mais de réflexions sur les neurosciences, le libre arbitre, la causalité et des interrogations sur l'existence de Dieu font aussi partie de ses études.

Rémy Lestienne met bien en lumière cette polymathie des travaux de Whitehead. Il souligne aussi l'évolution des idées et la création de nouveaux paradigmes comme les notions de «conrescences» ou de «process». Ces avancées intellectuelles ébranlent aussi les pensées intimes de Whitehead, puisqu'il passe de la croyance à l'agnosticisme et même à l'athéisme pour finalement se reconvertir au théisme avec des questions très fondamentales sur Dieu et la déité. Ce n'est pas là une versatilité, mais plutôt une recherche de la réalité, toujours incertaine.

Un ouvrage à lire par tous ceux qui s'intéressent aux questionnements primordiaux de la science et de la philosophie.

JACQUES COLIN
INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE, UNIVERSITÉ**LA FABULEUSE HISTOIRE DE NOS ORIGINES**Marc Azema et Laurent Casier
Dunod, 2020,
352 pages, 21,90 euros

Ce livre, préfacé par Jean Guillemin, professeur à la Sorbonne, France, donne de l'évolution de l'humanité un aperçu en racontant par petites

cannibalisme, *Homo sapiens* en Europe, peintures pariétales, domestication, lait, invention de l'écriture, Amazonie précolombienne, etc. : avec ses cent vingt petits textes consacrés chacun à un événement ou thème important, il offre une lecture facile et très agréable.

ATLAS DES VILLES MONDIALESCharlotte Ruggeri (dir.)
Autrement, 2020,
96 pages, 24 euros

Des géographes se sont associés pour dresser en revue les nombreuses problématiques des villes mondiales du moyen à petits

d'infographies fascinantes. Quel est l'effet du réchauffement climatique sur les villes ? Quelle est la dynamique des villes sud-américaines ? Les *fake news* ? Comment module-t-on le tourisme dans les villes européennes ? Ainsi présentés, les problèmes urbains et les solutions adoptées n'auront plus de secret pour le lecteur.

MISSION ANTARCTIQUEAnnabelle Kremer
Beyn, 2020,
224 pages, 19,90 euros

La sociologie de la science est peu vulgarisée. L'ambition de l'autrice est de la montrer dans le cas de la base Dumont d'Urville, en Antarctique.

plombiers, électriciens, etc. – qui concourent non seulement aux recherches, mais aussi à la survie du groupe, sont présentés par des portraits retraçant leur parcours et leur motivation. La vie à Dumont d'Urville, une expédition dans le désert blanc et le travail sur la fameuse mission antarctique sont aussi décrits par une belle plume. Une captivante immersion, illustrée par plus de soixante photographies, dans le fonctionnement d'une petite société scientifique.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LA SOUVERAINETÉ N'EST PAS UNE QUESTION DE NATION

Dans le domaine du numérique, la souveraineté dépend avant tout de la maîtrise des techniques utilisées et non de leur appartenance nationale.



La souveraineté numérique est souvent confondue avec l'idée d'État national.

Un mot est apparu dans les débats relatifs au développement des applications de traçage des personnes potentiellement porteuses du virus SARS-CoV-2: le terme «souveraineté». Ainsi, une application de traçage développée en France et dont les données sont hébergées en France est plus «souveraine» qu'une application développée à l'autre bout du monde et dont les données sont hébergées on ne sait où. D'autres critères sont également pris en compte dans cette évaluation de la souveraineté d'un logiciel, tels le fait qu'il soit développé par des acteurs publics ou privés, que son code source soit publié ou non, etc. Cette notion de souveraineté est désormais également utilisée dans d'autres débats relatifs au déploiement des réseaux téléphoniques de cinquième génération ou à la fabrication de médicaments.

Dès lors, le nom «souveraineté» est souvent associé à l'adjectif «national». Cependant, cette utilisation de la notion

de nation, dans le cadre d'une question d'éthique de l'informatique, peut paraître paradoxale, car les réseaux ont abolie la notion de distance et se jouent des frontières. D'ailleurs, les références géographiques sont brouillées par le fait que notre nation est à la fois la France et l'Union européenne, et que nous parlons parfois de souveraineté nationale et parfois de souveraineté européenne.

Les réseaux ont aboli la notion de distance et se jouent des frontières

En fait, dans le contexte de l'informatique, la notion de souveraineté n'a rien à voir avec celle de nation. Imaginons que nous utilisions un logiciel, que nous n'en soyons pas satisfaits et que nous souhaitions le modifier. Si cela nous demande peu d'efforts, nous

sommes souverains sur ce logiciel; si cela nous en demande beaucoup, nous ne le sommes pas.

Par exemple, quand nous utilisons, tout seuls, un logiciel que nous avons développé nous-mêmes, nous pouvons le modifier comme bon nous semble et notre souveraineté sur ce logiciel est donc complète. Quand nous nous servons d'un logiciel dont le code source est publié, nous pouvons, de même, le modifier, mais cela nous demande un peu plus d'efforts, puisque nous devons d'abord le comprendre. En revanche, quand nous utilisons un logiciel dont le code source n'est pas publié, nous ne pouvons absolument pas le modifier.

La situation est un peu plus complexe quand nous utilisons un logiciel de plusieurs. Par exemple, nous n'avons pas, individuellement, la possibilité de modifier un protocole de communication qui, par nature, doit être commun. Mais nous avons parfois la possibilité de modifier un tel logiciel, si nous sommes une majorité d'utilisateurs à le souhaiter. C'est notamment le cas d'une application de traçage, quand elle est développée par un État démocratique, mais non quand elle est développée par une dictature.

Quand un logiciel est développé par une entreprise privée géante, nous pouvons avoir, malgré tout, une certaine souveraineté sur ce logiciel. Par exemple, en 2012, la contestation du changement des conditions générales d'utilisation de l'application Instagram, par un grand nombre de ses utilisateurs – certains ayant même supprimé leur compte –, a contraint Facebook à annuler cette décision. Mais cela demande beaucoup d'efforts, pour un résultat incertain.

Veiller à ne pas utiliser que des logiciels sur lesquels les utilisateurs sont souverains, et non dépendants de la décision d'autres personnes, est, au bout du compte, très différent du nationalisme, c'est-à-dire de l'exaltation de la nation sous toutes ses formes. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria, enseignant à l'école normale supérieure et pilote d'éthique du numérique.

S
A-PC

Alliance Sorbonne
Paris Cité

Festival des idées Paris

20 – 21 nov.
2020

5^e édition

nouvelles normalités

Conférences, jeux, débats,
rencontres, tables rondes.

Gratuit dans le Grand Paris
et en ligne.

www.festivaldesidees.paris

philosophie

Le Point

RADIO PARIS

SCIENCE

SCIENCES
AVENIR

THE CONVERSATION

Levi's

Université
de Paris

Université
Sorbonne
Paris Nord

SciencesPo

inalco

PARIS
VAL DE
SEINE
PRESIDENTIELLE

APCOP

ined

f festivaldesidees

Instagram Festivaldesidees

Twitter FdiParis



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

DU CHERCHEUR AU YOUTUBEUR

Transmettre des connaissances scientifiques à un large public est un exercice d'équilibriste. Sur ce plan, les vidéastes sont dans l'air du temps



Comment j'ai tout compris à l'univers
53 936 VUES • 4 nov. 2020

14 K 243 PARTAGER

Il en est de la communication scientifique comme de la communication d'amour : c'est le destinataire qui fait vivre. Entretenir la flamme de la connaissance suppose un intérêt manifeste pour le public et une dose de dramaturgie. Si elle est peu intense, le désir de comprendre s'éteint ; si elle est trop forte, le contenu du message brule au profit d'un spectacle qui n'a plus rien de pédagogique. L'efficacité de la médiation scientifique se joue donc sur le fil du rasoir.

En outre, la confiance de ses publics, à l'heure de l'information instantanée, reste une gageure. À l'affiche des sujets suscitant les passions, la science « en train de se faire » pose le défi d'amener les savoirs spécialisés, souvent provisoires et incertains, vers le débat public. En ce cas, la communication autour de la crise sanitaire est particulièrement délicate. La nécessaire pluralité des regards conduit logiquement à des expertises contradictoires dont la synthèse influe sur le quotidien des populations. Épidémiologistes, virologues et infectiologues se succèdent

ainsi à la barre des médias dans une cacophonie de courbes et de mesures qui rend impossible toute cohérence d'ensemble. Comment rendre compte de cette histoire scientifique du temps présent ?

De nos jours, la captation de l'attention passe par l'image

Remontons le temps avec les travaux de Louis Figuier, célèbre vulgarisateur scientifique du XIX^e siècle. Cet écrivain prolifique lança l'idée d'un théâtre « capable d'intéresser, d'émouvoir ou d'amuser » à partir des données de la science. Reflétant « les idées, les mœurs et l'esprit général du temps », son théâtre visait à trouver dans la science un ressort dramatique, à s'instruire autant que les peuples que des phénomènes de la nature, à montrer la figure héroïque de

savants en évoquant leur fragilité humaine ou les leçons de sagesse que les animaux donnent aux humains avec sa « République des abeilles ». Ce spectacle « honnête et instructif » ne rencontra pourtant pas un franc succès.

À la différence d'un Jules Verne qui « créait de véritables intrigues romanesques, charnelles et haletantes », Figuier concevait les ressources des arts comme un moyen d'enseignement. Si les trois coups du brigadier n'ont pas réussi à effacer la blouse de l'instituteur, le mérite de ce père de la vulgarisation fut de comprendre l'importance d'une description scientifique fondée sur l'expérience des personnages. C'est l'inclusion du narrateur dans le récit qui fait le succès, dans les années 1980, d'ouvrages de vulgarisation tels que *L'Enigme de la vie*, du chimiste Alexander Graham Cairns-Smith. Agencé sur le modèle du roman policier, cet auteur développe pourtant une hypothèse très controversée sur le rôle de l'argile dans la formation des premières molécules organiques. Citons également *Patience dans l'azur*, de l'astrophysicien Hubert Reeves, qui reprend les ficelles de l'intrigue en y ajoutant la composition du merveilleux avec le regard poétique de Paul Valéry.

Dans l'espace numérique du XXI^e siècle, le système informationnel est autre. D'une part, la captation de l'attention passe par l'image ; d'autre part, la démarcation entre les journaux de la communauté scientifique et les réseaux conversationnels s'efface. De nouveaux formats de communication adaptés aux publics volatils doivent être trouvés et perfectionnés, dans l'idée d'articuler astucieusement recherches, pédagogie et récits de vie. Une expertise pour un contenu, une voix pour un conte, un sourire pour un film : on comprend que les vidéastes scientifiques soient devenus en quelques années les piliers d'une éducation populaire qui cherche à retrancher à tous cette nouvelle complexité. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche

17 novembre

• **Manipuler le climat, dernier rempart contre le réchauffement planétaire ?**

Roland Sférian, climatologue à Météo-France, Centre national de recherches météorologiques, Toulouse.

24 novembre

• **L'ingénierie écologique pour réparer ou améliorer les écosystèmes**

Luc Abbadie, directeur du laboratoire Biogéochimie et écologie des milieux continentaux, École normale supérieure (ENS)

1^{er} décembre

• **Des matériaux à l'architecture : s'inspirer du vivant**

Kalina Raskin, ingénieure physico-chimiste et docteur en biologie, directrice générale du Centre européen d'excellence en biomimétisme (CEEBIOS).

8 décembre

• **Le droit peut-il sauver la nature ?**

Table ronde avec :

Julien Bétaille, maître de conférences en droit public à l'université Toulouse 1 Capitole; Marine Calmet, juriste, présidente de Wild Legal; Pierre Charbonnier, philosophe, chercheur au CNRS, (sous réserve); Marine Denis, doctorante en droit international à l'université Sorbonne Paris Cité et porte-parole de l'association Notre affaire à tous.

Modération: Catherine Portevin, rédactrice en chef adjointe de Philosophie Magazine.

AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENCE** philosophie

La nature : entre artificialisation et source d'inspiration conférences

accès gratuit sur réservation obligatoire

— les mardis à 19h



Science... ça tourne !

cité

sciences et industrie

les chercheurs font leur cinéma festival

accès gratuit sur réservation obligatoire

28 novembre à 14h30

Edition

Cérémonie de clôture du 14^e Festival de très courts métrages de médiation scientifique d'Ile-de-France. Entre deux expérimentations dans leur laboratoire, de jeunes scientifiques s'emparent d'une caméra pour expliquer leur sujet de recherche en réalisant un court métrage de cinq minutes. Venez partager cette expérience originale et débattre avec eux.

Projection des films et débat avec les réalisateurs, les membres du jury et le public.

Vote et remise des prix.

→ En présence du jury :

Loïc Barché, réalisateur et scénariste; Élodie Bitsindou, doctorante en histoire de l'architecture contemporaine au centre André Chastel, Prix du jury 2019; Jean-Marc Hovasse, professeur de littérature française à Sorbonne Université, directeur de recherche CNRS à l'institut des textes et manuscrits modernes; Claire Rougeulle, directrice de recherche CNRS en génétique au centre Épigénétique et destin cellulaire, professeure à l'École polytechnique; Laélia Véron, maîtresse de conférence en stylistique à l'université d'Orléans.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



L'ESSENTIEL

On pensait que la détection d'objets interstellaires traversant le système solaire était peu probable. Pourtant, 'Oumuamua et Borissov ont été observés respectivement en 2017 et 2019.

> Alors que Borissov ressemble à une comète du système solaire, 'Oumuamua présente

de nombreuses caractéristiques atypiques.

> Ces corps apporteront

des informations sur les mondes d'où ils viennent et sur les processus de formation des planètes. Mais les étudier de près est un défi technique majeur.

LES AUTEURS



DAVID JEWITT
astronome à l'université de Californie à Los Angeles, aux États-Unis



AMAYA MORO-MARTÍN
astronome à l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore, aux États-Unis

Les premiers visiteurs interstellaires



Les astronomes ont récemment découvert dans le voisinage du Soleil des objets n'appartenant pas au Système solaire. Certes, ils avaient anticipé la présence de tels visiteurs venus de très loin. Mais les caractéristiques de l'un d'eux, nommé 'Oumuamua, intriguent les chercheurs.

1I/'Oumuamua (ici une vue d'artiste) est le premier objet interstellaire jamais observé dans le Système solaire. Il est passé à proximité de la Terre en 2017.

Dans la nuit du 24 octobre 2017, un courriel porteur de nouvelles captivantes est arrivé dans la messagerie électronique de Ben de nous (David Jewitt). L'astronome Davide Farnocchia, du laboratoire JPL, à la NASA, écrivait à propos d'un objet céleste à la trajectoire très étrange. Découvert à peine six jours plus tôt par Robert Weryk, de l'université de Hawaï, et initialement noté P10Ee5V, ce corps voyageait trop vite pour que le Soleil ne le maintienne sur une orbite fermée. Au lieu de décrire une ellipse comme les autres corps du Système solaire, son orbite était ouverte (hyperbolique), indiquant qu'il ne faisait que traverser le Système solaire et ne reviendrait jamais dans le voisinage du Soleil. De nombreux observatoires se sont alors mobilisés pour suivre ce bolide spatial.

Avec cette découverte, nous étions sur le point d'ouvrir une nouvelle fenêtre d'exploration dans le domaine de l'astronomie. Renommé C/2017 U1 («C» pour comète), puis A/2017 U1 («A» pour astéroïde) et, finalement, >

> 11/«Oumuamua, cet objet était le premier corps que les astronomes observaient dans le Système solaire qui venait d'ailleurs. Le «11» dans sa désignation lui donne le statut officiel de premier objet interstellaire jamais détecté. Robert Weryk et ses collègues, qui l'ont découvert grâce aux télescopes du programme d'observation Pan-Starrs installés sur l'île de Maui, dans l'archipel de Hawaï, ont proposé de le nommer 'Oumuamua, ce qui signifie en hawaïen «un messager de loin arrivé en premier».

TROP RAPIDE POUR APPARTENIR AU SYSTÈME SOLAIRE

La vitesse du bolide n'avait pas échappé à l'attention des chercheurs. Même en sous-trayant la contribution due à la force attractive exercée par le Soleil, 'Oumuamua se déplaçait à une vitesse anormalement élevée: 26 kilomètres par seconde. Aucune interaction avec un corps du Système solaire n'a pu propulser cet objet à une telle vitesse; et le champ gravitationnel du Soleil est trop faible pour le capturer. Conclusion: 'Oumuamua provient d'au-delà des frontières du Système solaire.

À quoi a ressemblé le voyage de cet objet? Les observations suggèrent qu'il provient d'une direction pointant vers l'étoile brillante Véga, dans la constellation de la Lyre, mais Véga ne se trouvait pas à cet endroit quand 'Oumuamua y était il y a environ 300 000 ans. De ce que l'on peut en dire, il erre peut-être dans la Galaxie depuis des centaines de millions d'années.

Les astronomes suspectent depuis longtemps que des corps interstellaires traversent régulièrement le Système solaire, mais en détecter un a été une réelle surprise. En 2016, grâce à une analyse exhaustive de nos capacités d'observation, Toni Engelhardt, de l'université de Hawaï, et ses collègues avaient conclu que les chances d'identifier un objet interstellaire étaient très faibles. Ces objets étaient probablement trop petits et trop sombres pour qu'on puisse les découvrir. 'Oumuamua a défait les probabilités. Mais alors que nous accumulions des données sur ce bolide, nous n'étions qu'au début de nos surprises. Tout – sa taille, sa forme, son manque d'attributs cométaires... – contredisait notre intuition et l'image que nous nous faisons de ces objets interstellaires. Si ce corps était représentatif des visiteurs venus de loin, nous avions beaucoup à apprendre!

Les observations effectuées avec le Télescope optique nordique et d'autres observatoires ont rapidement montré que 'Oumuamua est dénué des deux attributs principaux d'une comète: la queue et la chevelure (ou coma, qui correspond au halo de poussière et de glace sublimée, glace entourant le noyau de la comète et qui passe rapidement de l'état solide à gazeux). Il ressemble plutôt à un astéroïde rocheux. Mais sachant

que cet objet a traversé le vide interstellaire, où la température moyenne avoisine quelques degrés à peine au-dessus du zéro absolu, et que l'eau, après le dihydrogène, est la molécule la plus abondante, il est surprenant que 'Oumuamua ne transporte pas de glace, même en petite quantité.

La forme de cet objet soulève aussi son lot de questions. Les astronomes se fondent sur la brillance d'un corps pour en estimer la taille, car plus un objet est imposant, plus il reflète de lumière du Soleil vers la Terre. La brillance moyenne de 'Oumuamua suggère que son diamètre est d'environ 100 mètres, ce qui est assez petit si on le compare à la plupart des astéroïdes connus.

Avec un tel gabarit, si 'Oumuamua avait traversé le Système solaire au niveau de la ceinture d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, où résident la plupart des astéroïdes de ce système, nous ne l'aurions jamais vu. Mais nous avons eu de la chance: cet objet est passé très près de la Terre, à seulement 60 millions de kilomètres (ce qui représente 40% de la distance Soleil-Terre).

VAISSEAU EXTRATERRESTRE OU MOUTON DE POUSSIÈRE?

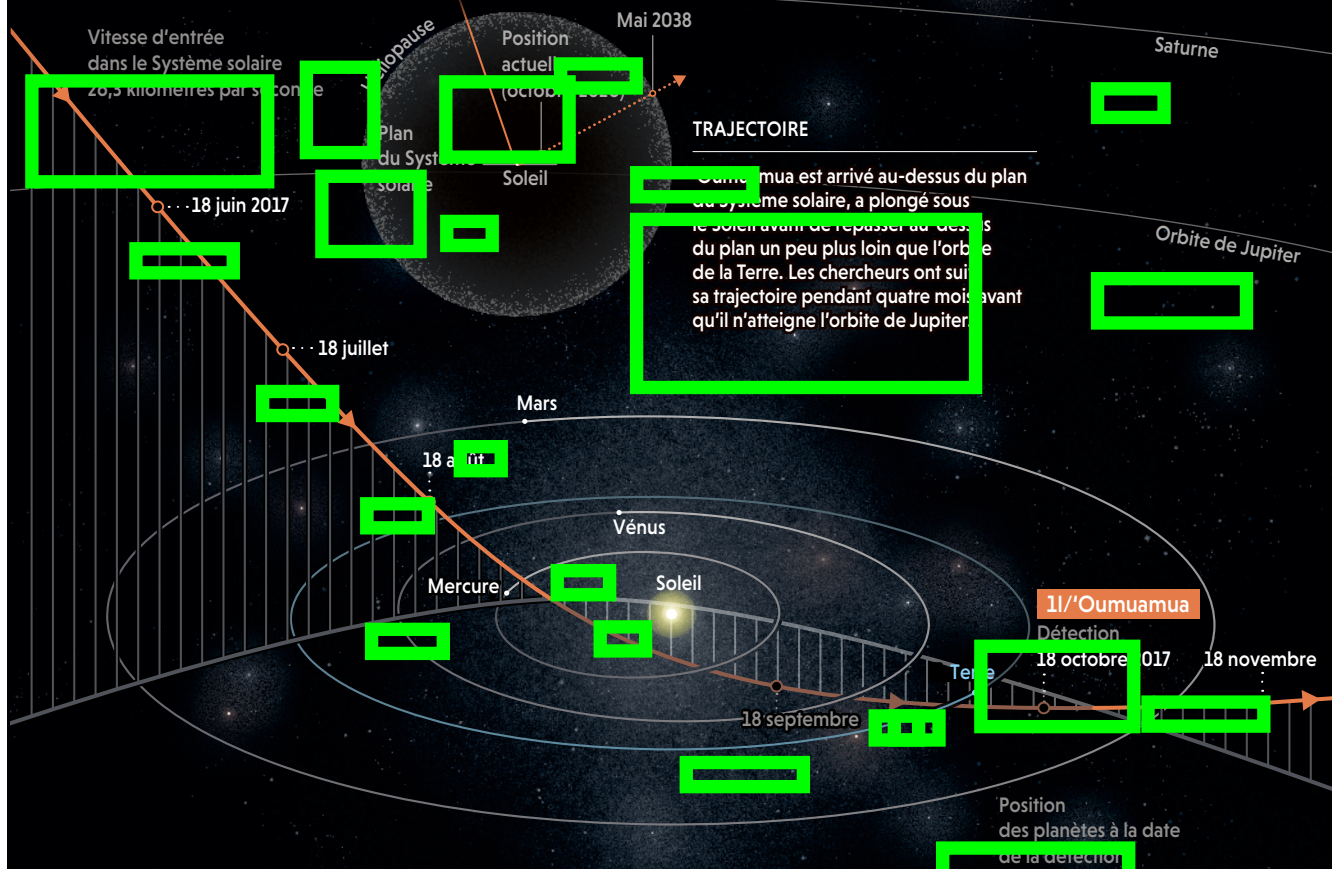
La brillance de la plupart des astéroïdes, qui ont des formes sphéroïdes grumeleuses, varie de façon cyclique car, en rotation sur eux-mêmes, ces objets nous présentent alternativement des faces plus ou moins grandes. Les variations de la brillance permettent de tracer une «courbe de lumière» de l'objet et d'en déduire les proportions de celui-ci. En décembre 2017, les chercheurs avaient collecté assez de données pour tracer la courbe de lumière de 'Oumuamua. Sa période de huit heures n'était pas particulièrement atypique comparée aux autres astéroïdes. En revanche, là où ces derniers ont une variation de brillance de 10 à 20% au cours de leur rotation, 'Oumuamua voit sa lumière varier d'un facteur 10. Cela suggère que ce corps a une forme très effilée et qu'il présente vers la Terre tantôt une face large, tantôt un côté très étroit.

La taille et les proportions de 'Oumuamua rappellent celles des grosses fusées (par exemple, *Saturn V* mesure 110 mètres de hauteur pour 10 mètres de largeur). Il faut noter >

Les chances d'identifier un objet interstellaire étaient très faibles

1I/'OUMUAMUA

Les astronomes sont perplexes face à nombre de caractéristiques de ce premier visiteur interstellaire jamais observé. Ils ne savent expliquer ni sa forme oblongue ni sa dynamique, qui semble influencée par une force autre que l'attraction gravitationnelle du Soleil et de ses planètes. Or l'objet ne semble pas dégazer à la manière des comètes.



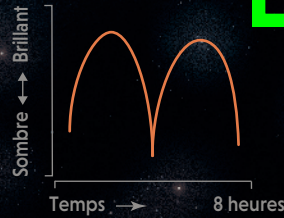
DÉTECTION

1I/'Oumuamua a été découvert pour la première fois par Robert Weryk en utilisant le télescope de 1,6 mètre du programme Pan-STARRS, sur l'île Maui, à Hawaï.



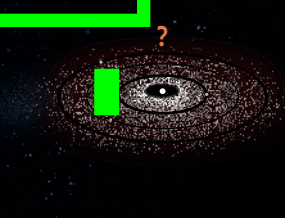
ASPECT

Les dimensions précises sont inconnues. Sa forme est très allongée, ce qui le distingue nettement des milliers d'objets du Système solaire qui ont été étudiés.



COURBE DE LUMIÈRE

Les astronomes ont déterminé la forme de 1I/'Oumuamua grâce à sa courbe de lumière, les variations au cours du temps de la lumière qu'il réfléchit. Les changements rapides suggèrent que l'objet est très allongé et présente vers nous tantôt un petit côté, tantôt une grande surface.



ORIGINE

Cet objet provient selon toute probabilité d'un lointain système planétaire, d'où il a été éjecté il y a très longtemps.

> que des astronomes qui surveillent le ciel à la recherche de comètes et d'astéroïdes redécouvrent parfois des fusées abandonnées flottant dans l'espace, en orbite autour du Soleil. Ainsi, l'objet 2000 SG344, repéré en 2000, est peut-être un débris du programme *Apollo*. Mais 'Oumuamua a une orbite trop extrême pour être une fusée des années 1960. Pourrait-il s'agir d'une fusée d'une civilisation extraterrestre? Aussi incroyable que cette idée puisse paraître, les astronomes n'ont pas assez d'éléments pour exclure cette possibilité.

De façon surprenante, une autre observation a alimenté cette hypothèse. En juin 2018, l'astronome italien Marco Micheli, de l'Agence spatiale européenne, et ses collègues ont analysé la trajectoire de 'Oumuamua. Ce dernier semblerait subir l'action d'une force, comparable à une poussée de fusée, en plus des forces gravitationnelles exercées par le Soleil et ses planètes.

De telles forces non gravitationnelles sont bien connues dans le cas des comètes. Elles naissent du fait d'une poussée asymétrique due à la sublimation de la glace sur la seule face du noyau cométaire éclairée par le Soleil. Mais 'Oumuamua n'est pas une comète et il ne montre aucun signe de perte de masse. L'objet émettrait-il du gaz, plus difficile à détecter que de la poussière cométaire? Le cas serait unique : les astronomes ne connaissent aucun exemple de corps qui émet uniquement du gaz, sans glace ou poussière.

En novembre 2018, Shmuel Bialy et Avi Loeb, du centre d'astrophysique Harvard et du Smithsonian, ont proposé que cette force non gravitationnelle résulterait de la pression de radiation exercée par la lumière du Soleil. Mais pour que l'effet soit assez important pour être mesurable, il faudrait que 'Oumuamua soit très fin, comme du mylar (le film plastique aluminisé utilisé pour les ballons à hélium), ou d'une faible densité. Les deux chercheurs ont ainsi suggéré que l'objet était peut-être une voile solaire, un vaisseau spatial construit par une autre civilisation et conçu pour être propulsé à travers l'espace par la lumière des étoiles.

Cette idée est considérée comme très controversée par la plupart des astronomes. Les uns privilégient une origine naturelle. En février 2019, l'une de nous, Amaya Moro-Martín, a calculé que 'Oumuamua devrait être cent fois moins dense que l'air pour être propulsé par la lumière du Soleil. Ce « nuage de poussière » cosmique serait un agrégat glacé formé dans les régions reculées d'un disque protoplanétaire. Celui-ci aurait une structure poreuse avec une géométrie fractale (la masse volumique ne suivrait pas une relation en r^3 mais en r^D , où D est un nombre – la dimension fractale – compris entre 2 et 3, r étant le rayon d'un élément de volume élémentaire de l'agrégat).

Jane Luu, Eirik Flekkøy, de l'université d'Oslo, en Norvège, et Renaud Toussaint, de l'université de Strasbourg, ont proposé que 'Oumuamua serait né de l'agglomération de particules de poussière dans la chevelure d'une comète active, et se serait ensuite échappé de son hôte. De telles structures, de tailles inférieures au centimètre, ont effectivement été observées dans la chevelure de la comète Tchouri par exemple. Les trois chercheurs ont montré que de tels agrégats pouvaient atteindre la taille de 'Oumuamua, survivre dans le vide du milieu interstellaire et résister aux contraintes mécaniques de leur rotation et aux forces de marée lors de leur passage dans le Système solaire. En revanche, sur Terre, ces structures fractales ne supporteraient pas la pesanteur et s'effondreraient. Ces structures pourraient aussi piéger un peu de glace d'eau lors de la formation (ou en traversant des zones extérieures et froides de systèmes stellaires), mais la glace se sublimerait rapidement à l'approche d'une étoile. Cela expliquerait pourquoi 'Oumuamua n'avait pas d'attributs cométaires au moment de sa détection.

DES MILLIERS D'OBJETS SIMILAIRES?

Malgré toutes les bizarreries de 'Oumuamua, le plus étonnant est que de tels objets pourraient être assez nombreux dans le Système solaire. On sait que cet objet de petite taille a été détecté parce qu'il est passé assez près de la Terre et parce que nous disposons depuis quelques années d'instruments assez puissants pour l'observer. Le programme *Pan-Starrs* a démarré ses observations en 2010, mais n'a atteint sa pleine capacité que récemment. Avec un raisonnement probabiliste à partir de ces deux faits, les chercheurs ont estimé que le nombre de visiteurs interstellaires s'élevait peut-être à un corps pour un volume de 10 unités astronomiques au cube (une unité astronomique correspond à la distance Terre-Soleil). Ainsi, si l'on considère un volume sphérique centré sur le Soleil et s'étendant jusqu'à l'orbite de Neptune, il y aurait environ 10 000 objets similaires à 'Oumuamua. Et si l'on considère que ces voyageurs venus du loin mettent dix ans à traverser cette région, il devrait en arriver environ trois par jour!

Si l'on se fie à cette analyse statistique, que peut-on conclure quant à l'origine de 'Oumuamua? Si l'on reprend l'idée d'extraterrestres envoyant des restes de fusées ou de voiles solaires et que l'on extrapole à toute la Voie lactée, on arrive à un nombre vertigineux de 10^{24} à 10^{25} objets similaires dans la Galaxie. Difficile d'imaginer qu'une civilisation ait les capacités de produire autant de débris dans l'espace. Ces arguments plaident plutôt pour une origine naturelle. Dès lors, la grande majorité des astronomes pensent que 'Oumuamua



L'objet 2I/Borissov (ici une vue d'artiste), le deuxième visiteur interstellaire détecté (en 2019), présente les mêmes caractéristiques que les comètes du Système solaire.

est juste un objet de forme étrange, venu d'ailleurs dans la Voie lactée.

Le caractère atypique de 'Oumuamua a plongé les astronomes dans une profonde perplexité. Nous avons donc hâte de découvrir un second visiteur interstellaire. Serait-il aussi bizarre que 'Oumuamua? Ou ressemblerait-il à une comète ou un astéroïde du Système solaire?

UNE DEUXIÈME DÉCOUVERTE

À partir du nombre estimé de ces visiteurs dans le Système solaire, nous avions anticipé

que le second objet devrait être observé probablement en moins d'un ou deux ans. Pour notre plus grand plaisir, deux ans après 'Oumuamua, un astronome amateur ukrainien, Guennadi Borissov, a découvert C/2019 Q4 avec son télescope fait maison. L'objet a rapidement été renommé 2I/Borissov, le second objet interstellaire.

Sa trajectoire est encore plus extrême que celle de 'Oumuamua: en revanche, son aspect est comparable à celui d'une comète ordinaire. Les données du télescope spatial *Hubble* ont montré que son noyau est plus large que 'Oumuamua, avec un rayon compris entre 200 et 500 mètres. La courbe de lumière de 2I/Borissov est bien plus régulière que celle du premier visiteur

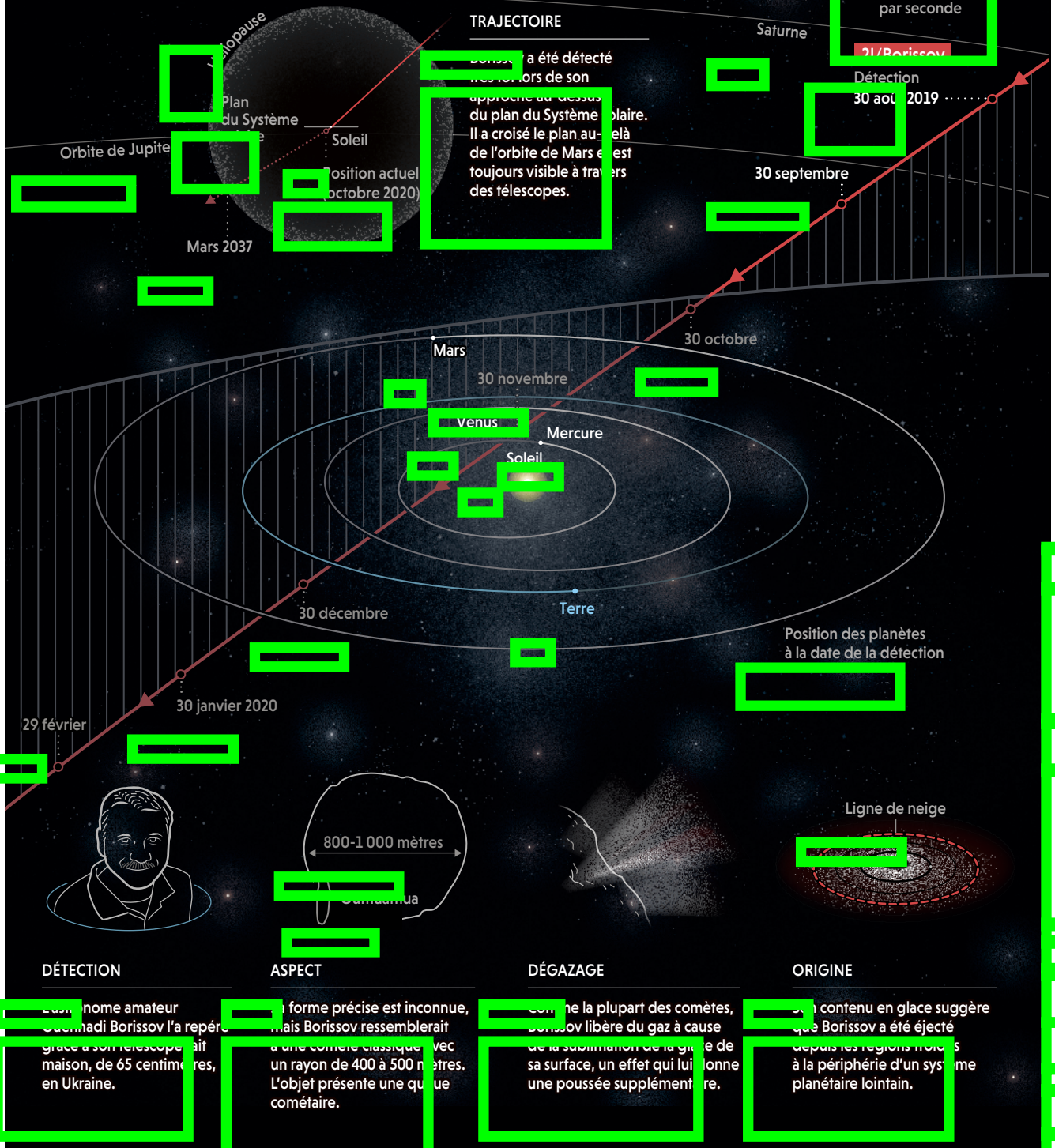
interstellaire et ses mouvements d'origine non gravitationnelle s'expliquent très bien à partir du dégazage asymétrique, comme pour les comètes du Système solaire. En mars 2020, sa brillance a subitement augmenté et son apparence semblait s'être dédoublée alors qu'un petit bloc du noyau s'est décroché, un phénomène que l'on observe souvent avec les autres comètes. En d'autres termes, ce corps correspondait bien mieux à l'image que nous nous faisons des visiteurs interstellaires.

Cette intuition que nous avions sur les propriétés de ces corps repose sur nos connaissances en matière de formation planétaire. Certains des mécanismes en jeu tendent à éjecter des objets en dehors de leur système natal et à les éparpiller à travers la Galaxie. Puis quelques-uns de ces corps finissent par traverser notre petit coin du cosmos.

Pour illustrer ce phénomène, prenons le cas du Soleil formé il y a 4,6 milliards d'années dans un disque aplati de gaz, de glace et de poussière, résultat de l'effondrement d'un nuage moléculaire géant sous son propre poids. Ce disque était assez dense pour que des grains minuscules se percutent et restent collés les uns aux autres. D'abord, des cailloux se sont formés, puis des corps plus gros nommés «planétésimaux» et finalement des planètes. Pour

2I/BORISSOV

Le deuxième visiteur interstellaire est très différent du premier. Il ressemble à une comète normale, avec une forme assez sphérique et sans dynamique inhabituelle. Borissov présente les caractéristiques qu'anticipaient les chercheurs pour un objet qui viendrait d'au-delà du Système solaire et qui serait un reliquat éjecté des régions externes et glacées d'un système planétaire en formation.



> une partie des planétésimaux, le processus de croissance a été interrompu car ils ont été dispersés (par l'influence gravitationnelle de Jupiter notamment) dans les régions les plus reculées du Système solaire. Là, dans le froid extrême, ils sont restés sans presque évoluer depuis cette époque lointaine.

Mais, parfois, certains de ces objets peuvent être renvoyés vers la partie interne du Système solaire, où la chaleur du Soleil sublime leur glace. Ils forment alors des queues cométaires. D'autres objets sont au contraire totalement éjectés du système et se retrouvent alors à dériver dans le milieu interstellaire. Perdus dans l'immensité de la Voie lactée, ces derniers traversent parfois d'autres systèmes stellaires. Étant donné l'aspect chaotique de cette dynamique et les déviations de la trajectoire de ces corps errants sous l'influence du champ gravitationnel des étoiles rencontrées, il est impossible de dire depuis combien de temps ces objets dérivent et d'où ils viennent exactement.

Chaque jour, trois visiteurs interstellaires entreraient dans le Système solaire

Néanmoins, nous pouvons affirmer avec certitude que l'espace est un environnement riche en glace issu des régions périphériques d'un disque protoplanétaire d'une étoile inconnue. Tout ce que nous avons appris sur Borissov – et la preuve que certains objets interstellaires sont exactement ce que nous avons imaginé – ne fait qu'exacerber l'étrangeté de 'Oumuamua. Ces deux objets sont tellement différents qu'ils ont sans doute des origines différentes.

La découverte de Borissov a donc ramené les questions sur la nature de 'Oumuamua et de nouvelles idées ont été avancées. En mai 2020, Darryl Seligman, de l'université de Chicago, et Gregory Laughlin, de l'université Yale, ont suggéré que 'Oumuamua était un nouveau type d'objet constitué de glace d'hydrogène moléculaire, une sorte d'iceberg cosmique formé dans les régions les plus froides des nuages moléculaires. Mais, en juin, Avi Loeb et Thiem Hoang, de l'institut d'astronomie et des sciences spatiales de Corée, ont rétorqué que l'hydrogène moléculaire est si volatil qu'un tel

corps n'aurait pu ni se former dans un nuage ni survivre au voyage interstellaire. Autre piste:

Yun Zhang, des observatoires astronomiques de l'Académie chinoise des sciences, et Douglas Lin, de l'université de Californie à Santa Cruz, ont suggéré que 'Oumuamua pourrait être un débris produit par la dislocation gravitationnelle d'une planète ou d'un autre corps passé trop près de son étoile hôte.

'Oumuamua est un vrai casse-tête qui nous oblige à revoir notre compréhension de la formation des systèmes planétaires. En effet, à partir de nos modèles de cette formation, nous pouvons aussi estimer le nombre de visiteurs interstellaires dans notre voisinage. Et dans les scénarios les plus généreux, on atteint tout juste le dixième, voire le centième, du chiffre évoqué plus haut de l'ordre de 10 000 objets de ces visiteurs dans notre voisinage. En d'autres termes, nous ne savons pas expliquer pourquoi il y a autant de débris interstellaires. Il n'est pas impossible qu'en détectant plus de visiteurs, en améliorant notre compréhension de ces bolides, les deux valeurs incompatibles de leur densité dans l'espace convergeront. Mais il se pourrait aussi qu'un élément nous échappe, comme un mécanisme encore inconnu qui produit en grande quantité des débris interstellaires.

REVISITER LA PANSPERMIE

La découverte de visiteurs interstellaires peut être une source de nouvelles informations sur la formation des systèmes planétaires, mais elle apporte aussi des éléments de réflexion sur une autre question fondamentale en science: comment la vie a-t-elle commencé sur Terre? Le scénario de la panspermie suggère que des astéroïdes portant des germes d'anciens organismes les auraient transportés depuis un autre système planétaire vers le nôtre. Que peut-on désormais dire de ce scénario?

Si des visiteurs interstellaires pénètrent régulièrement dans le Système solaire, il n'est pas improbable que l'un d'eux percute occasionnellement la Terre. À partir du nombre estimé de visiteurs interstellaires, on peut avancer qu'un tel bolide frapperait notre planète tous les 100 à 200 millions d'années (soit des milliers de fois moins souvent que des astéroïdes du Système solaire de même taille). La plupart de ces corps se disloqueraient et se vaporiseraient dans l'atmosphère, mais certains pourraient atteindre le sol. Au cours du temps, plusieurs milliards de tonnes de matériau interstellaire auraient été déposées sur Terre.

Ces impacts ont-ils pu apporter la vie sur notre planète? De façon surprenante, les astéroïdes et les comètes offriraient des conditions peut-être suffisantes pour transporter des cellules du vivant pourtant si fragiles. Les rayons cosmiques, si nocifs pour l'ADN, ne pénètrent >

'Oumuamua est peut-être un agrégat glacé de poussières de structure fractale

> que de quelques mètres dans un matériau

ment enfouies dans la roche pourraient survivre à un voyage interstellaire ayant duré des millions ou des centaines de millions d'années. À des températures proches du zéro absolu, n'importe quelle cellule serait dans un état d'hibernation profonde». Encore faut-il qu'elles résistent au choc de l'entrée dans l'atmosphère et de l'impact au sol. Or des expériences ont montré que des bactéries terrestres étaient capables de survivre à des collisions à des vitesses cosmiques. Si la panspermie reste un scénario très spéculatif, elle est néanmoins une piste intéressante.

Pour mieux comprendre les objets interstellaires, notre priorité est d'en trouver d'autres. Avec seulement deux objets pour l'instant, notre collection reste limitée. Grâce aux progrès constants de l'astronomie, il est certain que nous identifierons bientôt des dizaines de ces objets. Avec ces découvertes, nos calculs statistiques sur leur nombre seront moins grossiers et nous aurons une meilleure vue d'ensemble sur leurs propriétés physiques. La plupart des télescopes professionnels ont un champ de vision très étroit, typiquement quelques millièmes de la surface apparente de la Lune. Ils ne sont donc pas les plus efficaces pour traquer les visiteurs interstellaires. Mais certains détecteurs à champ large sont capables d'observer la Lune en une seule fois et le ciel complet en une nuit ou deux. Grâce à de puissants ordinateurs, nous pouvons analyser ces panoramas complets pour y trouver des objets en mouvement.

Avec l'observatoire Vera-Rubin, en cours de construction au Chili, nous aurons un outil vraiment performant pour cette recherche. Ce télescope sera doté d'un miroir collecteur de 8,4 mètres de diamètre et un détecteur de 3 milliards de pixels... des caractéristiques inimaginables il y a à peine dix ans. Chaque image de cette gigantesque caméra couvrira un aire 40 fois plus grande que la Lune. Cet observatoire devrait repérer un grand nombre de

visiteurs interstellaires, mais aussi une foule d'astéroïdes, de comètes et d'objets de la ceinture de Kuiper de notre propre système.

Si nous réussissons à observer beaucoup de visiteurs interstellaires, nous répondrons à de nombreuses questions les concernant. Combien parmi ceux-ci présentent-ils un corps oblong et sans glace comme 'Oumuamua et combien ressemblent plus à une comète comme 2I/Borissov? Certains sont-ils vraiment poreux au point de pouvoir être déviés par la pression de la lumière?

Mais pour vraiment comprendre la nature d'un tel visiteur, l'idéal serait de pouvoir y envoyer une sonde spatiale pour l'observer de près ou même de s'y poser pour en récupérer un échantillon. L'obstacle majeur est qu'il faudrait être capable de préparer une telle mission en très peu de temps, tant ces bolides traversent rapidement le Système solaire. Petit et peu lumineux, 'Oumuamua a disparu et s'est retrouvé hors de portée des télescopes les plus puissants quelques mois après sa découverte. 2I/Borissov ne brillera plus assez d'ici à un an ou deux. Or il faut au moins une décennie pour concevoir, faire valider, construire et lancer une mission spatiale. Dans ces conditions, il semble impossible de prévoir un rendez-vous avec un objet interstellaire de passage.

Une solution serait de lancer et placer la sonde sur une orbite d'attente avant même de savoir où elle sera ensuite envoyée. C'est l'idée suivie par l'Agence spatiale européenne avec *Comet Interceptor*, qui devrait décoller en 2028. La sonde sera placée au point de Lagrange L2 de la Terre (un point gravitationnellement stable) distant de 1,5 million de kilomètres. Elle pourra y maintenir une orbite stable en attendant le passage d'un objet intéressant. Cependant, l'*Interceptor* n'aura pas la puissance suffisante pour rattraper un visiteur interstellaire, à moins que l'un d'eux ne passe par chance à proximité du point L2.

Pour atteindre de tels objectifs, il faudra utiliser des fusées puissantes. Mais celles-ci, plus lourdes, sont aussi les plus chères à faire décoller. Et même si l'on peut espérer sur voler un jour un visiteur interstellaire, accélérer une sonde pour rivaliser de vitesse avec un tel bolide afin d'y récupérer un échantillon est un défi énorme. Il faudra probablement se tourner vers de nouvelles techniques de propulsion, comme les voiles solaires poussées par la pression de radiation solaire ou par un puissant laser depuis la Terre. Mais ces approches ont leurs propres difficultés... Malgré tout, examiner de près un objet qui vient d'au-delà des frontières du Système solaire serait une perspective extraordinaire et les chercheurs ne manquent pas d'idées pour y parvenir. D'une façon ou d'une autre, nous réussirons à percer les secrets de ces visiteurs interstellaires.

BIBLIOGRAPHIE

J. X. Luu et al., 'Oumuamua as a cometary dust aggregate: the "Bunny" model, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 900, L22, 2020.

D. Jewitt et J. Luu, Initial characterization of interstellar comet 2I/Borissov, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 886, L29, 2019.

D. Jewitt et al., Interstellar Interceptor 2I/Borissov: Observations from the NOT and WIYN telescopes, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 850, L36, 2017.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL 1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr
actus, dossiers, archives depuis 1996

Votre cadeau : le livre *Pourquoi le Soleil brille*
de Roland Lehoucq (37931069)

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 98,80€

79€

Au lieu de 130,40€

99€

Au lieu de 190,40€

10%

réduction

10%

réduction

10%

réduction

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour la Science – 26 Bd President Wilson – CS40032 – 67085 Strasbourg Cedex – email : pouirlascience@abopress.fr

PAG20NOE

☒ OUI, je m'abonne

pour 1 an à **POUR LA SCIENCE**

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Carte bancaire

N° :

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

Signature obligatoire :

☐ FORMULE PAPIER
• 12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU

59€
Au lieu de 98,80€

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS-SÉRIE
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
+ UN CADEAU

79€
Au lieu de 130,40€

☐ FORMULE INTÉGRALE
• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus
+ UN CADEAU

99€
Au lieu de 190,40€

* Réduction par rapport au prix de vente en magasin des numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 1,90 € et le livre *Pourquoi le Soleil brille* pour 16,00 €.

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

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



© Traci Dabeko

L'ESSENTIEL

Il y a comme quelque 20 000 boucles dans chacune de nos cellules. Nous partageons nombre de ces boucles avec d'autres organismes dont les souris.

> Le mécanisme qui produit ces boucles apparaît

à celui qui permet d'ajuster la longueur des sangles d'un sac à dos.

> Ces boucles interviennent dans la régulation de l'activité des gènes et sont impliquées dans certaines maladies.

L'AUTEUR



EREZ LIEBERMAN AIDEN
directeur du Centre pour l'architecture du génome à la faculté de médecine Baylor et à l'université Rice, à Houston, aux États-Unis

Le génome, un fouillis bien ordonné

L'ADN de nos cellules est bien plus organisé dans l'espace qu'on ne le pensait. Il présente des domaines à différentes échelles et d'étonnantes boucles mouvantes...

Multipliez la taille du génome humain par un million. À cette échelle, chaque molécule d'ADN – chaque chromosome – est aussi large qu'une nouille *rāmen*. Mis bout à bout, les 46 chromosomes du génome d'une cellule humaine s'étendraient de Paris à Héliopolis, même si, repliés, ils tiennent dans une structure de la taille d'une maison – le noyau cellulaire. Ensemble, les 46 chromosomes contiennent environ 20 000 gènes en deux exemplaires. Chaque gène – aussi long qu'une voiture dans notre échelle imaginaire – porte un message codé indiquant à la cellule comment fabriquer une protéine particulière.

Si vous observez le noyau, vous verrez l'ADN s'y tortiller. Lorsque j'étais docteur, il y a environ dix ans, je me demandais, en remuant les nouilles *rāmen* de mon com-

comment le génome évitait de s'emmêler en un fouillis qui empêcherait l'envoi de ses messages génétiques.

En 2014, mes collègues et moi avons apporté un élément de réponse à cette question, qui a renforcé la prise de conscience actuelle que la structure du génome dans le noyau est loin d'être aléatoire. Sous la houlette de mes étudiants Suhas Rao, Miriam Huntley et Adrian Sanborn, notre équipe a découvert que le génome humain se replie de telle façon qu'il forme plusieurs milliers de boucles.

Ces boucles semblent aider à contrôler l'activité des gènes. Toutes les cellules possèdent les mêmes gènes, et si l'activité de ces gènes était la même dans toutes les cellules, le corps ne pourrait pas exister: rien ne distinguerait une cellule du muscle cardiaque d'une cellule du cerveau. La façon dont ces différents profils sont orchestrés a longtemps été une énigme, mais les boucles apportent une explication. >

> Elles seraient l'un des contrôleurs des profils d'expression des gènes, un chef d'orchestre qui influencerait sur le moment où des gènes particuliers deviennent suffisamment actifs pour modifier le fonctionnement des cellules.

UN FACEBOOK POUR LE GÉNOME

Mes réflexions sur l'enchevêtrement de l'ADN étaient liées à une question plus large : comment l'agencement tridimensionnel de l'ADN dans le noyau cellulaire influence-t-il sur l'activité des gènes ? Depuis la fin des années 1970, s'accumulaient les preuves indiquant que de petits segments d'ADN, nommés « séquences stimulatrices », ou *enhancers*, étaient nécessaires pour activer les gènes. Ces séquences se trouvaient parfois très loin de leurs gènes cibles sur la molécule d'ADN. Pour actionner l'interrupteur qui active un gène – un segment d'ADN adjacent au gène et connu sous le nom de « promoteur » –, la molécule d'ADN devait donc rapprocher du promoteur la séquence stimulatrice, vraisemblablement en se repliant sur elle-même. Mais cette conjecture était-elle correcte ? Ce problème m'était capitivé et je n'ai trouvé qu'une seule façon de le résoudre : trouver toutes les boucles.

Le plan pour y parvenir était simple en théorie. Si deux personnes se fréquentent particulièrement souvent, il est logique de supposer qu'elles sont amies. De même, si deux segments d'ADN – ou « loci » – très éloignés l'un de l'autre le long du chromosome ont tendance à se fréquenter particulièrement souvent, alors l'ADN s'est probablement replié en boucle. Pour tester cette hypothèse, il nous fallait donc un moyen de mesurer la fréquence d'interaction des différentes parties du génome : une sorte de Facebook du génome humain.

Pour transformer notre idée en réalité, nous avons adapté une méthode décrite en 1993 par Katherine Cullen, alors à l'université Vanderbilt, aux États-Unis, et ses collègues. À l'époque, la structure du génome avait résisté à toutes les formes connues d'imagerie : comme un mauvais sujet de portrait, les chromosomes remuaient sans arrêt. Mais Katherine Cullen a tourné cette agitation en un avantage. Lorsque les chromosomes s'agitent, différentes parties du génome se heurtent les unes aux autres. Et les parties les plus proches dans l'espace se heurtent probablement souvent, tandis que celles éloignées se rencontrent rarement. Ainsi, en mesurant la fréquence des collisions, il devait être possible de déterminer quelles parties du génome étaient proches dans l'espace.

Pour cela, Katherine Cullen et ses collègues ont développé une technique qu'ils ont appelée le « test de ligature nucléaire ». En

substance, prenez des cellules et, sans détruire leurs noyaux, stabilisez leurs génomes.

Ensuite, envoyez une enzyme couper l'ADN en petits morceaux et déployez une protéine qui fusionne les extrémités de deux fragments voisins, les rassemblant en un seul brin. Enfin, examinez la séquence des paires de bases de l'ADN (les lettres appariées du code de l'ADN) dans l'ensemble des fragments fusionnés obtenus. Si, d'une cellule à l'autre, vous observez des fusions de deux fragments d'ADN qui d'habitude sont éloignés le long d'un chromosome, vous pouvez conclure que ces deux fragments se retrouvent souvent proches l'un de l'autre dans le noyau.

Cette approche a permis à Katherine Cullen de montrer que deux morceaux d'ADN s'entrechoquaient bien plus souvent que le hasard ne l'aurait prédit. En d'autres termes, l'ADN formait une boucle qui les rapprochait.

En 1993, les expériences utilisant le test de ligature nucléaire étaient difficiles à réaliser. Heureusement, à l'époque où j'ai vu l'article de Katherine Cullen, au milieu des années 2000, il existait une référence du génome humain et le séquençage de l'ADN devenait très bon marché. Avec trois collègues de l'institut Broad, aux États-Unis, – Chad Nusbaum, Andreas Gnirke et Eric Lander – nous avons esquissé une approche pour analyser la fréquence de contact non pas d'une seule paire de fragments dans l'ADN, mais de toutes celles du génome.

Les boucles s'étaient conservées pendant au moins 60 millions d'années d'évolution

en même temps. Cette approche nous permettait aussi de déterminer exactement d'où venait chaque fragment fusionné.

Nous avons décidé de fonder notre nouvelle méthode sur une variante de la procédure de Katherine Cullen développée par Job Dekker, de la faculté de médecine de l'université du Massachusetts. Au lieu de conserver les noyaux cellulaires intacts, Job Dekker les a pulvérisés et a effectué les étapes du test dans une solution très diluée. Cette variante, qu'il a nommée « capture de la conformation chromosomique »,

ou «3C», semblait fournir une estimation plus fiable de la fréquence de collisions.

Ensuite, nous avons ajouté quelques étapes à la méthode 3C. Avant de coller les fragments ensemble, nous avons attaché des étiquettes aux extrémités de l'ADN cassé afin de marquer les endroits où deux morceaux fusionneraient. Et une fois les fragments collés, nous les avons coupés en plus petits morceaux, parmi lesquels nous n'avons conservé que ceux portant des étiquettes – et donc les jonctions. En appliquant cette procédure avec Job Dekker, Nynke van Berkum, alors chercheuse en postdoctorat dans son laboratoire, et Louise Williams, de l'institut Broad, nous avons découvert que nous pouvions identifier des millions de contacts d'un seul coup. Nous avons publié cette méthode, nommée Hi-C, en 2009.

DES CHROMOSOMES DIVISÉS EN DOMAINES

Nos toutes premières cartes de génomes entiers obtenues par cette méthode ont montré que les chromosomes, malgré leur agitation, ne se repliaient pas en un amas aléatoire à l'intérieur du noyau. Au contraire, chaque chromosome était divisé en domaines: des portions d'ADN contenant des segments en contact fréquent les uns avec les autres. Les loci d'un domaine interagissaient moins fréquemment avec ceux d'autres domaines. De plus, les domaines se répartissaient en deux grandes régions dans le noyau, que nous avons nommées «compartiments A et B».

Le compartiment A était riche en marqueurs de l'activité génétique, tels que des ARN messagers – des émissaires des gènes – qui donnent des instructions au reste de la cellule. Le compartiment B était plus dense et en grande partie inactif. Lorsque des domaines étaient activés ou désactivés, ils passaient d'un compartiment à l'autre. (Aujourd'hui, on sait que les noyaux des cellules contiennent plusieurs sous-compartiments A et B.)

La découverte de cette compartimentation dynamique confirmait que la structure à grande échelle du génome n'est pas aléatoire, mais plutôt intimement liée à l'activité des gènes. Toutefois, à ma grande déception, une caractéristique de repliement n'apparaissait pas dans les données de Hi-C: les boucles...

Ces données sont souvent représentées sous la forme d'une «carte thermique», une représentation graphique montrant à quelle fréquence deux loci d'un chromosome entrent en contact l'un avec l'autre. De telles représentations ressemblent à un jeu de bataille navale où les chiffres et les lettres seraient remplacés par les loci d'un chromosome. On obtient alors un quadrillage où chaque point représente un contact possible entre deux loci et où la fréquence de contact est indiquée par la

luminosité du point. Une boucle devait donc se manifester par un point exceptionnellement

lumineux correspondant aux deux loci qui entrent en contact pour la former. Or nous n'avions pas observé de tels pics de luminosité. Et sans la preuve de l'existence des boucles, impossible d'examiner si les séquences stimulatrices activaient les gènes en se rapprochant de leurs promoteurs.

CARTOGRAPHIER LES BOUCLES

Cet problème nous a occupé pendant trois ans. Puis, en 2012, Suhas Rao et Miriam Huntley ont compris d'où il venait: un aspect de la méthode Hi-C – la destruction des noyaux des cellules avant la fusion des fragments d'ADN – perturbait les structures fines telles que les boucles. Ils ont donc mis au point une variante qui maintient les noyaux intacts.

La nouvelle approche, nommée «*in situ* Hi-C», a fait la différence. En l'utilisant sur des globules blancs, Suhas Rao et Miriam Huntley ont découvert que des pics lumineux apparaissent désormais sur toutes nos cartes thermiques, chacun représentant une boucle potentielle. Ces points lumineux n'étaient-ils pas le fruit de notre imagination? Pour m'en assurer, j'ai rapporté les cartes à mon fils, Gabriel, qui avait alors 3 ans: «Vois-tu un point rouge?» «Oui», a-t-il répondu. «Peux-tu le montrer?» Il le pouvait.

Nous l'avions: une carte montrant quelque 10 000 boucles réparties le long du génome humain. Nous avons vérifié si les boucles reliaient les promoteurs des gènes et les séquences stimulatrices. C'était souvent le cas.

Dans un autre test, nous avons comparé nos cartes thermiques des cellules sanguines avec de nouvelles cartes obtenues cette fois pour des cellules du poumon. Un grand nombre de boucles étaient semblables, mais on y notait aussi de nouvelles connexions – potentiellement entre des séquences stimulatrices et des gènes différents. Ces modifications suggéraient que les boucles étaient impliquées dans la régulation des gènes qui donnent à une cellule son identité.

En observait-on dans d'autres organismes? Pour le savoir, nous avons cartographié les boucles dans des cellules de souris: la noblesse de ces structures étaient positionnées aux mêmes endroits du génome correspondant à des boucles du génome humain. Elles existaient donc déjà chez l'ancêtre des souris et des humains et s'étaient conservées pendant au moins 60 millions d'années d'évolution.

Nos données avaient révélé une autre information intéressante: les boucles ne sont pas statiques. Elles semblaient en effet continuellement apparaître, se défaire, se reformer. Nous avons voulu savoir comment cela fonctionnait. Nous pensions que des centaines de >

> protéines étaient impliquées, mais les données ont raconté une autre histoire.

Boucle après boucle, deux facteurs protéiques se sont distingués. L'un, appelé CTCF, a été découvert en 1990 par Victor Lobanov, alors au Royal Cancer Hospital, à Londres, et ses collègues. Il contient onze structures dites «à doigt de zinc» qui lui permettent de se lier étroitement à certains endroits de l'ADN. Le second facteur, la cohésine, décrit en 1997 par Kim Nasmyth, aujourd'hui à l'université d'Oxford, est un complexe en forme d'anneau constitué de plusieurs protéines. À l'époque de nos travaux, les biologistes pensaient que deux anneaux de cohésine étaient capables de se lier et de fonctionner ensemble, chacun encerclant l'ADN et glissant librement sur lui comme un anneau sur un collier.

Retrouver ces protéines n'était pas si surprenant : de nombreuses études antérieures avaient suggéré qu'elles intervenaient dans le repliement du génome. Mais leur implication dans un mécanisme aussi omniprésent que la formation des boucles d'ADN était inattendue.

DES MOTIFS À BOUCLE

C'est alors que nous avons fait une découverte très étrange. Subash Rao, Miriam Huntley et moi avions demandé à Ido Machol, un nouvel informaticien au laboratoire, d'étudier la distribution des histones – des protéines qui aident à compacter l'ADN dans le noyau – à proximité des facteurs CTCF. Ido Machol a remarqué que les histones étaient plus nombreuses juste à l'extérieur des boucles qu'à l'intérieur, comme si ces protéines savaient où une boucle était positionnée par rapport aux molécules CTCF. Ce résultat ressemblait à une erreur, mais au fil des semaines, Ido Machol n'a détecté aucun bug dans son programme.

Nous avons donc recherché une explication biologique. Victor Lobanov avait montré que CTCF ne s'attache pas à des positions arbitraires sur l'ADN. Au contraire, le facteur se lie toujours à une séquence spécifique d'environ 20 bases, nommée «motif». L'ADN étant une double hélice, il comporte deux brins orientés en opposition. Chaque brin peut porter des motifs, par conséquent orientés dans un sens ou l'autre sur la longue molécule d'ADN. En général, l'orientation relative des motifs le long de l'ADN est aléatoire, comme un tirage au sort : il y a 50 % de chances qu'un motif donné pointe dans un sens et 50 % de chances qu'il pointe dans l'autre. Nous pensions donc qu'il en serait de même pour les motifs de liaison à CTCF.

Or, à notre grand étonnement, les deux minuscules motifs de liaison à CTCF qui intervenaient dans la formation d'une boucle – même s'ils étaient séparés par des millions de bases dans l'ADN déplié – pointaient

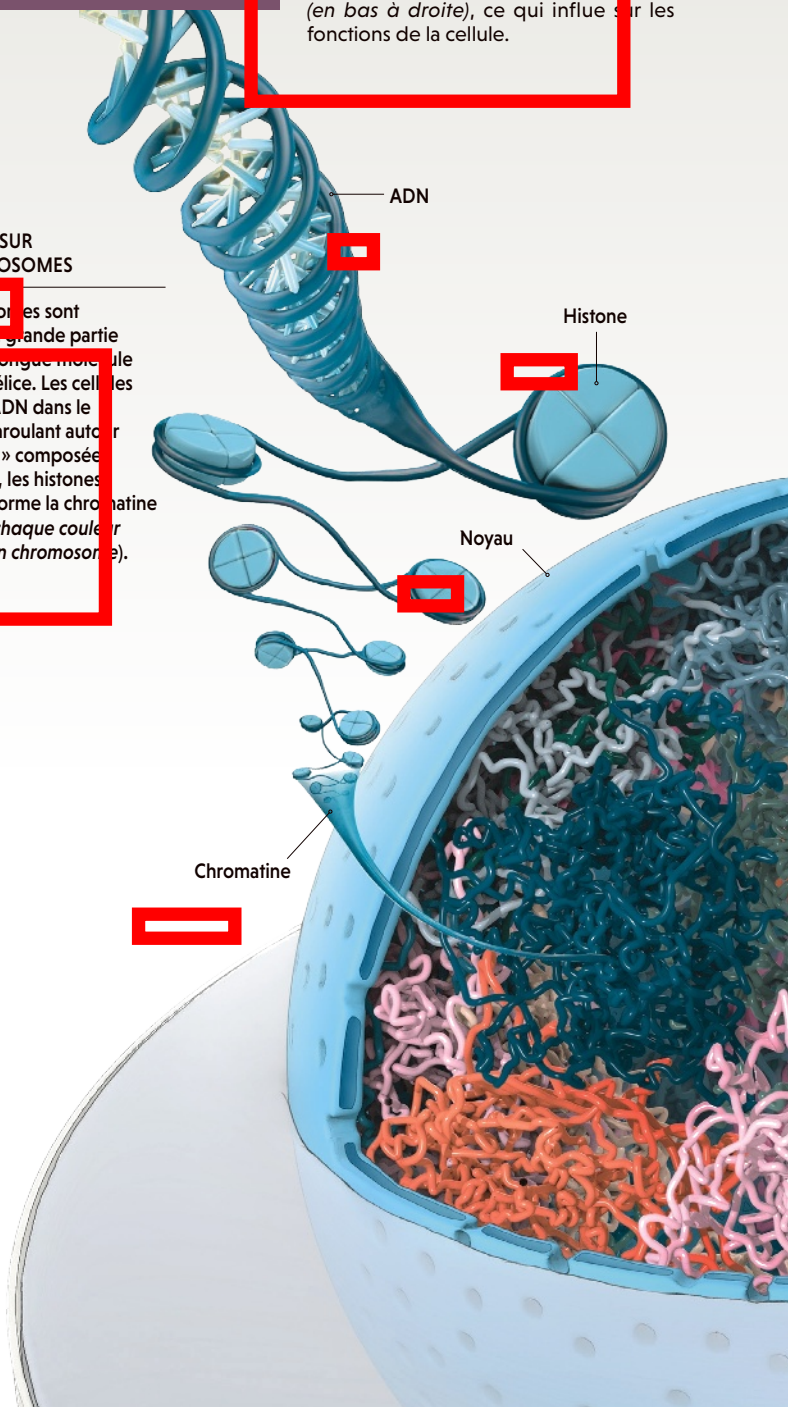
UN GÉNOME BOUCLÉ

Au microscope, le génome d'une cellule – l'ensemble de ses chromosomes – ressemble à un enchevêtrement de nouilles. Pourtant, la disposition est loin d'être aléatoire. Par exemple, avec une meilleure résolution que celle utilisée ici, on verrait que le génome se plie en environ 10 000 boucles. Des travaux récents ont révélé un processus de formation des boucles, nommé «extrusion» (en haut à droite). Ces boucles favorisent l'expression ou l'activation de certains gènes dans différentes cellules (en bas à droite), ce qui influe sur les fonctions de la cellule.

GROS PLAN SUR LES CHROMOSOMES

Les chromosomes sont constitués en grande partie d'ADN, une longue molécule en double hélice. Les cellules emballent l'ADN dans le noyau en l'enroulant autour de «bobines» composées de protéines, les histones. L'ensemble forme la chromatine (ci-dessous, chaque couleur représente un chromosome).

© Falconieri Visuals



COMMENT LES BOUCLES SE FORMENT

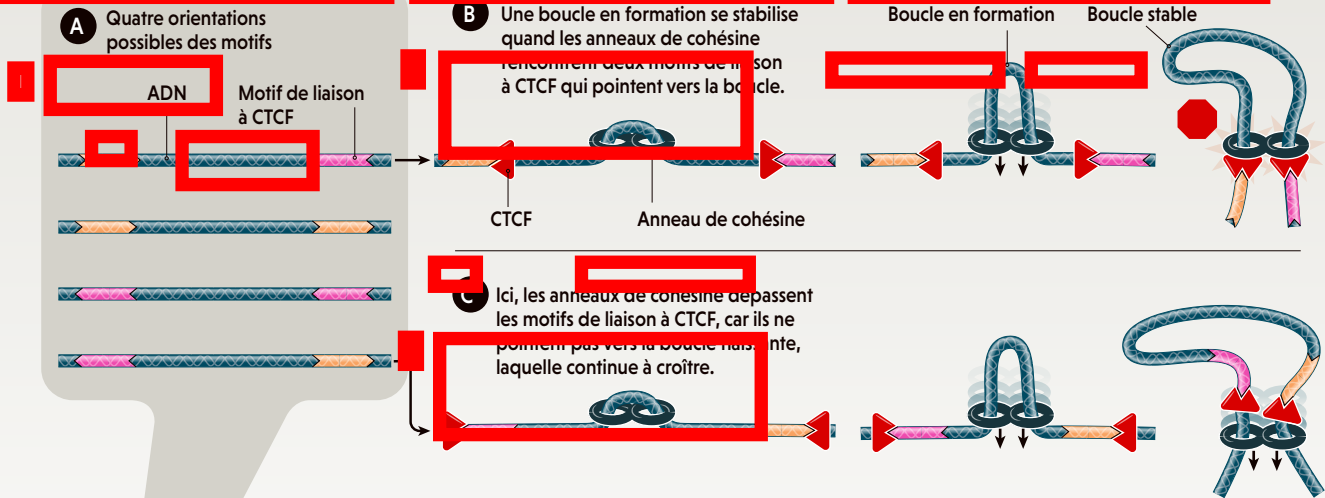
Le complexe d'extrusion rencontre l'ADN et s'y ancre. La boucle se forme lorsque deux sous-unités du complexe, comportant chacune une structure en anneau nommée « cohésine », se mettent à glisser dans des directions opposées

le long de l'ADN tout en restant attachées ensemble. Une protéine, CTCF, est capable

d'arrêter la croissance de la boucle dans certaines conditions. Elle se lie à une séquence particulière de l'ADN, laquelle pointe dans un sens ou l'autre de la molécule (A). Lorsqu'un anneau de cohésine rencontre une protéine CTCF liée à un motif

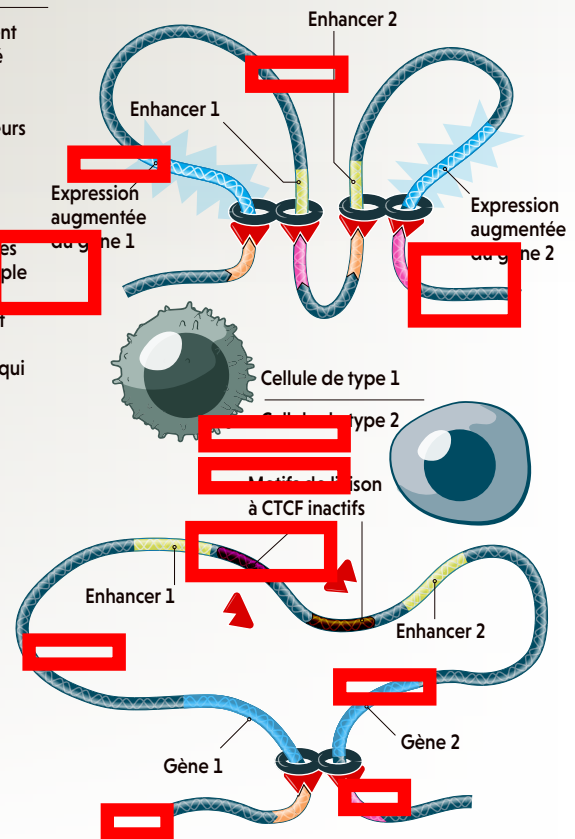
pointe vers la boucle, l'anneau s'arrête. Si le motif est orienté dans l'autre sens, l'anneau continue

d'avancer. Quand les deux anneaux rencontrent des protéines CTCF liées à des motifs pointant vers l'intérieur, ils s'arrêtent donc tous les deux, ancrant la boucle (B). Dans toutes les autres configurations, la boucle continue de croître (C).

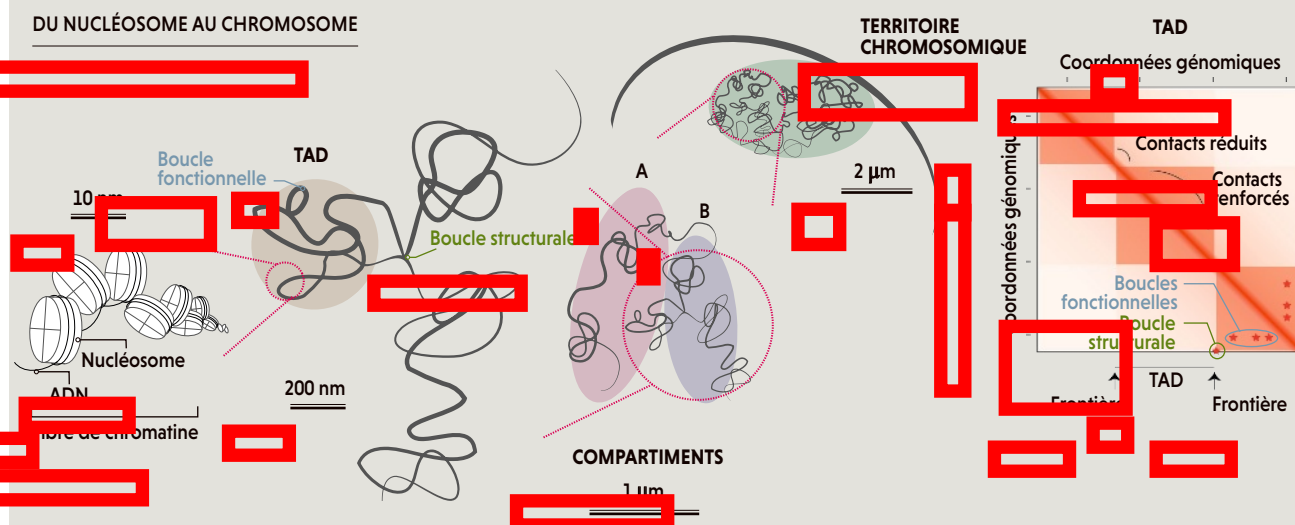


L'INTÉRÊT DES BOUCLES

Pour fonctionner correctement, certains gènes doivent entrer en contact avec un segment d'ADN nommé « enhancer ». Mais les enhancers se trouvent souvent loin des gènes qu'ils activent. Les boucles rapprochent les enhancers et leurs gènes (en haut). Toutes les cellules présentent les mêmes gènes et les mêmes motifs de liaison aux protéines CTCF, mais elles ne forment pas toutes les mêmes boucles. Il arrive par exemple que les motifs de liaison à la protéine CTCF soient désactivés à certains endroits de l'ADN, ce qui empêche la protéine de s'y lier (en bas).



DU NUCLÉOSOME AU CHROMOSOME



UNE ORGANISATION À TOUTES LES ÉCHELLES

L'organisation spatiale du génome est tout d'abord une affaire de cellules. On connaissait le premier échelon de cette organisation, le nucléosome

qui avait été révélée en 1997. Le nucléosome permet d'enrouler la molécule d'ADN et représente donc un premier niveau de compaction de l'ADN pour former la fibre de chromatine (voir la figure ci-dessus à gauche). À l'autre bout de l'échelle, on savait, grâce à des approches cytologiques et de microscopie photonique, que les chromosomes s'organisent en territoires chromosomiques individuels, occupant des positions préférentielles dans les noyaux suivant leur activité génique ou leur densité en gènes ou encore leur taille. En revanche, au milieu de l'échelle, les choses paraissaient beaucoup plus floues.

On avait notamment observé des repliements à large échelle entre des régions génomiques éloignées, ainsi que des regroupements de gènes même lorsqu'ils étaient situés sur

des chromosomes différents. Bien sûr, on soupçonnait aussi l'existence de repliements de la fibre de chromatine, et, par là même, de rapprochements physiques entre les promoteurs des gènes et leurs séquences stimulatrices ou « enhancers » – les boucles qui font l'objet de cet article. Les enhancers sont de véritables boutons d'activation, parfois situés à plusieurs dizaines de milliers de paires de bases des gènes qu'ils régulent.

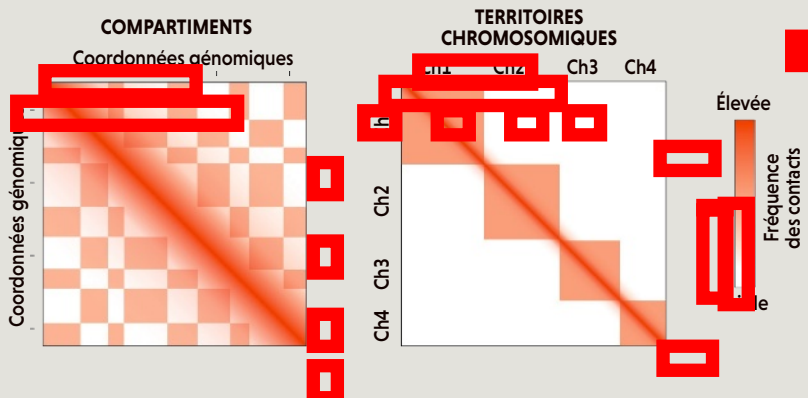
Des avancées majeures dans la compréhension de l'organisation spatiale du génome, de la centaine de kilobases (100 000 paires de bases) jusqu'à la mégabase (1 million de paires de bases), ont vu récemment le jour grâce à l'application de nouvelles techniques de biologie moléculaire, telles que la méthode Hi-C.

En 2009, on a vu apparaître les premières cartes de Hi-C, qui saisissent l'ensemble des contacts entre régions génomiques dans l'espace tridimensionnel du noyau. Plus précisément, ces représentations cartographient la fréquence de chacun des contacts possibles sous la forme de points plus ou moins intenses (voir ci-dessus à droite). Les premières cartes avaient une résolution relativement faible, mais on y distinguait déjà des organisations préférentielles à large échelle : les territoires chromosomiques, l'organisation en compartiments actifs et réprimés, appelés respectivement compartiments A et B. En 2012, l'application de la méthode Hi-C ou de dérivées avec une résolution accrue a permis à trois équipes – la nôtre, celle d'Edith Heard, à l'institut Curie, et celle de Bing Ren, à l'institut Ludwig pour la recherche sur le cancer à La Jolla

aux États-Unis – de découvrir de nouveaux domaines d'organisation de la chromatine, qui sont désormais appelés TAD (pour *topologically associating domains*).

Le long des chromosomes, les TAD représentent des zones du génome caractérisées par des interactions internes bien plus fortes que les interactions de TAD adjacents. Entre les TAD, on trouve de véritables frontières, qui conduisent à la partition du génome en une série de TAD. L'obtention de cartes de Hi-C à très haute résolution a permis de mettre en évidence de nombreuses boucles d'ADN, décrites dans cet article. Certaines, dites « structurales », séparent les TAD les uns des autres. D'autres, situées à l'intérieur des TAD, joueraient divers rôles fonctionnels. Certaines rapprocheraient des promoteurs et des enhancers, d'autres les deux extrémités d'un gène (ce qui renforcerait la direction selon laquelle le gène est transcrit), d'autres encore se formeraient entre des sites reconnus par des protéines impliquées dans la répression de nombreux gènes – les protéines du groupe Polycomb –, renforçant leur action. En d'autres termes, les TAD permettent de mieux confiner certaines régions du génome, ce qui facilite des repliements de la fibre chromatinienne et la régulation de l'expression des gènes.

La découverte de ces différents échelons de l'organisation des chromosomes a ouvert de nouvelles voies d'investigation sur la compréhension du fonctionnement du génome, ainsi que sur celle de maladies dont l'origine restait mystérieuse. Notamment, des réarrangements chromosomiques, de type



L'organisation de la chromatine aux différentes échelles (à gauche) apparaît lorsque l'on cartographie la fréquence des contacts entre les différentes régions du génome (à droite).

inversion ou délétion, surviennent au niveau des régions frontalières des TAD. Cela a pour effet d'entraîner des défauts d'isolement entre les gènes. Ainsi, des séquences stimulatrices localisées dans le TAD voisin peuvent communiquer et activer de manière erronée des gènes dans des tissus où ils sont normalement éteints. C'est par exemple le cas de gènes du développement directement impliqués dans des malformations des membres (syndrome F, polydactylie...), des défauts neurologiques ou des dysplasies. De même, des réarrangements chromosomiques peuvent entraîner l'activation de gènes nommés « proto-oncogènes », normalement éteints dans les cellules et susceptibles de conduire à la transformation des cellules et à l'apparition de tumeurs. Il est donc primordial de prendre en compte l'organisation 3D du génome pour expliquer les nombreux défauts cellulaires liés à la dérégulation des gènes.

De façon plus générale, grâce à tous ces travaux, on comprend bien mieux l'organisation 3D des génomes. Néanmoins, des questions primordiales demeurent : quels mécanismes précis définissent la taille et les bordures des TAD ? Quel est leur rôle dans la régulation des fonctions du génome ? Enfin, sera-t-il possible de prédire, dans un type cellulaire donné, la régulation de son expression génique en connaissant la séquence de l'ADN et son organisation tridimensionnelle ? Les recherches dans ce domaine révéleront sans doute de nouvelles surprises...

FRÉDÉRIC BANTIGNIES
ET GIACOMO GUALLI

directeurs de recherche au CNRS,
Institut de génétique humaine
(CNRS, université de Montpellier)

> toujours l'un vers l'autre et vers la boucle. Cette « règle de convergence » expliquait comment les histones évitaient les boucles : il leur suffisait de déterminer dans quelle direction le motif de liaison à CTCF pointait. En revanche, le fait que l'orientation des motifs ne soit pas aléatoire défiait notre entendement.

Pour mettre les choses en perspective, grossissons à nouveau le génome un million de fois. Les motifs mesurent à présent chacun 5 millimètres de long et sont séparés par 1 kilomètre de nouille génomique. Et pourtant, comme guidés par une boussole magique, ceux situés aux extrémités d'une boucle pointent toujours l'un vers l'autre. Comme tout bon tour de magie, la règle de convergence semblait impossible. De plus, elle contredisait l'idée que l'on avait alors de la façon dont les boucles se forment.

À l'époque, presque tout le monde – y compris nous-mêmes – pensait qu'elles apparaissent par diffusion. Dans cette hypothèse, une protéine nécessaire à la formation d'une boucle se lie à une extrémité d'un segment d'ADN. Une autre fait de même à l'autre extrémité. Comme à son habitude, l'ADN se tortille. Si finalement sa danse réunit les deux protéines, elles forment un lien physique, créant ainsi une

Presque tout le monde pensait que les boucles apparaissaient par diffusion

boucle. Le problème est que la chaîne d'ADN a tellement de place pour s'agiter que, si le modèle de diffusion est correct, l'orientation relative des motifs de liaison à CTCF n'a plus d'importance. Or, pourtant, on assistait à une convergence. Et de fait, au cours de l'année, deux équipes, l'une dirigée par Suzana Haljani, de l'University College de Londres, et l'autre par Yijun Ruan, du laboratoire Jackson aux États-Unis, avaient confirmé la règle de convergence avec leurs propres données. La règle était là pour rester, et les boucles ne se formaient donc pas par diffusion. Comment apparaissent-elles alors ? Et quels étaient les rôles de CTCF et de la cohésine ? Décontenancés, nous avons commencé à jouer avec les câbles de nos écouteurs.

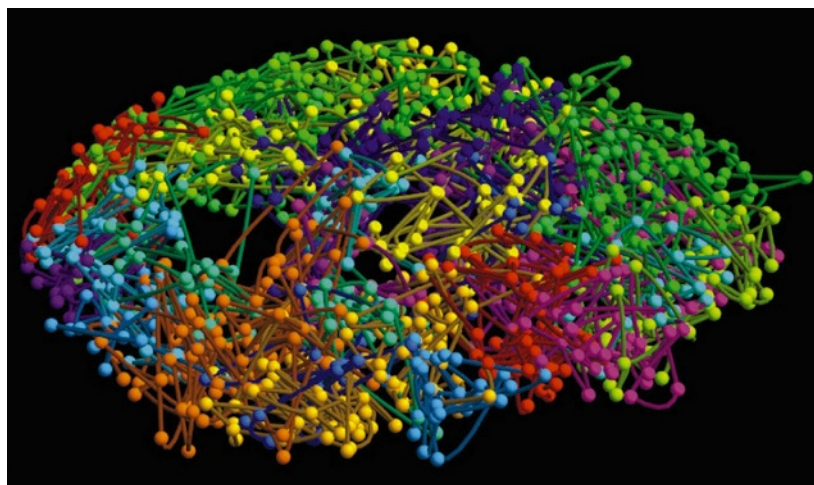
> La plupart des personnes qui travaillent sur le repliement du génome gardent à portée de main un objet long et flexible: un morceau de fil, un tube en plastique. Lorsque vous êtes bloqué sur un problème difficile, vous sortez cet objet et jouez avec. Un jour, Suhas Rao et moi faisons passer les écouteurs d'un côté à l'autre pour explorer les modèles possibles de formation de boucles, quand soudain, nous avons compris que la réponse était non pas dans nos écouteurs, mais sur nos sacs à dos.

UNE BOUCLE DE SANGLE OU LEAU DES BOUCLES

Prenez la boucle de sangle qui en ajuste la longueur des bretelles. Elle est plus ou moins constituée de deux anneaux attachés l'un à l'autre. La sangle entre dans le premier et sort dans le second. Pour régler sa longueur, vous en tirez une partie à travers l'un des anneaux et commencez à former une boucle. Vous pouvez l'agrandir tant que vous ne butez pas sur l'extrémité de la sangle.

Et si les paires d'anneaux de cohésine fonctionnaient comme des boucles de sangle ? Au début, elles s'attacheraient n'importe où sur le génome, l'ADN entrant par un anneau et sortant par l'autre. Mais ensuite, les deux anneaux glisseraient dans des directions opposées, extrudant au fur et à mesure une boucle. Mais ils ne glisseraient pas indéfiniment. L'un d'eux finirait par s'approcher d'un site où une molécule de CTCF est liée. Avec un motif de liaison à CTCF pointant vers l'anneau, celui-ci s'arrêterait au contact. Mais avec un motif en sens inverse, la cohésine l'ignorerait et continuerait de glisser. Le deuxième anneau glisserait de la même manière jusqu'à un motif de liaison à CTCF orienté vers l'intérieur, ce qui terminerait la boucle.

Si les anneaux de cohésine fonctionnaient réellement de cette manière, alors les boucles ne se formeraient qu'entre des paires de motifs de liaison à CTCF obéissant à la règle de convergence. Nous avons vite compris que ce processus d'extrusion apporterait un avantage crucial aux cellules. Si les boucles apparaissaient par diffusion, elles s'entremêlèrent facilement, conduisant les chromosomes à former des nœuds et à



Cartographier à la fois l'organisation du génome et l'expression des gènes dans l'espace 3D du noyau d'une même cellule humaine, c'est la nouvelle étape que vient de franchir l'équipe de Xiaowu Zhuang, à l'université Harvard. Grâce à une technique d'imagerie à haut débit et haute résolution, les chercheurs ont détecté en temps la position de quelque 1 000 régions du génome (à gauche, où chaque couleur se rapporte à un chromosome, et à droite en gris) et la trace de l'expression de quelque 1 100 gènes localisés dans ces régions (à droite, où chaque sphère repère l'expression d'un gène, et sa taille l'intensité de cette expression).

s'enchevêtrer. Cela compliquerait le fonctionnement des gènes et empêcherait les chromosomes de se séparer lors de la division cellulaire. En revanche, les boucles produites par extrusion ne forment pas de nœuds ou d'enchevêtrements – à l'instar des bretelles de votre sac à dos.

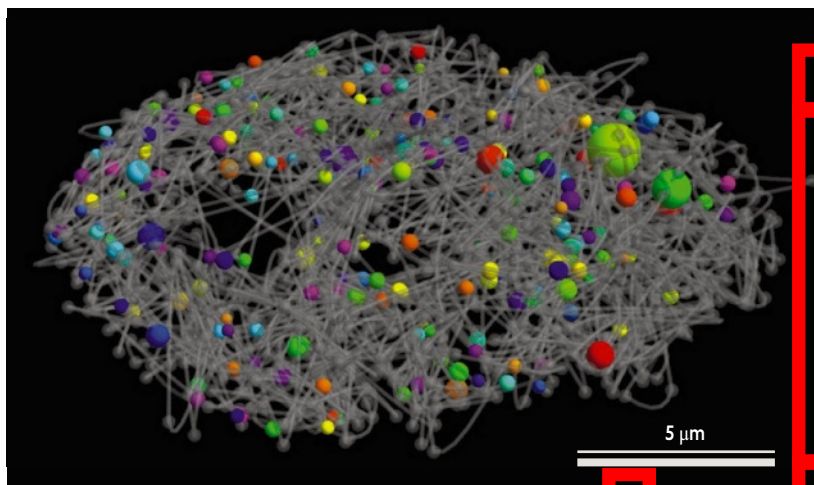
Le modèle était de la pure spéculation. Il reposait sur de nombreuses hypothèses, pour lesquelles nous n'avions pas la moindre preuve directe, comme l'idée que la cohésine glissait le long de l'ADN. Nous avions peur d'être partis dans un délire. Mais en nous plongeant dans la littérature sur la cohésine, nous avons appris que Kim Nasmyth lui-même avait proposé en 2001 que la cohésine puisse extruder l'ADN.

Adrian Sanborn a alors effectué des simulations détaillées qui rendaient compte avec précision des données de nos cartes. Et lorsque Suhas Rao a effectué des expériences sur de l'ADN réel, la position des boucles correspondait exactement de la manière prédite par le modèle d'Adrian Sanborn: la suppression d'un motif de liaison à CTCF impliquée dans la formation d'une boucle éliminait celle-ci; l'inversion de l'orientation d'un motif faisait de même et entraînait la formation d'une boucle de l'autre côté; le ajout d'un motif de liaison à CTCF produisait aussi une nouvelle boucle – tant qu'il pointait dans la bonne direction; enfin, il était possible d'ajouter et de supprimer des boucles à volonté.

Le domaine était en ébullition. Fin 2015, à quelques semaines d'intervalle, trois équipes dont la nôtre ont publié des articles montrant que ce type de chirurgie 3D du génome fonctionnait. De même, trois équipes – celle de Leonid Mirny, à l'institut de technologie du Massachusetts, la nôtre et deux chercheurs de l'université Emory, Michael Nichols et Victor Corces – ont argumenté que la règle de convergence favorisait un modèle dans lequel les boucles se forment par extrusion. La communauté scientifique commençait enfin à démêler l'écheveau.

Les progrès se sont poursuivis à un rythme effréné. Aux instituts Gladstone, Benoît

La fonction principale des boucles reste peut-être à découvrir



BIBLIOGRAPHIE

J.-H. Su et al., **Genome-wide imaging of the 3D organization and transcriptional activity of chromatin**, *Cell*, vol. 182, pp. 1641-1659, 2020.

M. Ganji et al., **Real-time imaging of DNA loop extrusion by condensin**, *Science*, vol. 360, pp. 102-105, 2018.

A. L. Sanborn et al., **Chromatin extrusion explains key features of loop and domain formation in wild-type and engineered genomes**, *PNAS*, vol. 112(47), pp. E6456-E6465, 2015.

S. S. P. Rao et al., **A 3D map of the human genome at kilobase resolution reveals principles of chromatin looping**, *Cell*, vol. 159(7), pp. 1665-1680, 2014.

T. Misteli, **La vie agitée du génome**, *Pour la Science*, n° 465, mai 2011.

K. E. Cullen et al., **Interaction between transcriptional regulatory regions of prolactin chromatin**, *Science*, vol. 261, pp. 2003-2006, 1993.

multiples boucles délimitées par CTCF se forment, puis sont éliminées.

L'équipe de Stefan Mundlos, de l'Institut Max-Planck de génétique moléculaire à Berlin, a montré que la modification d'un seul motif de liaison à CTCF chez la souris entraîne des malformations des pattes. De même, les humains présentant une mutation similaire ont des malformations semblables. Et Rafael Casellas, des Instituts américains de la santé (NIH), a montré que la perturbation des motifs de liaison à CTCF dans un plasmocytome de souris – une forme de cancer – pouvait ralentir de 40% la croissance de la tumeur.

Cependant, à mesure que la notion d'extrusion de boucles s'est imposée, des théories plus fondamentales sur le rôle des boucles dans la régulation des gènes se sont effondrées. Pendant des décennies, les biologistes avaient vu ces structures comme des interrupteurs: lorsqu'une boucle rapprochait une séquence stimulatrice et un promoteur, le gène correspondant s'activait. On pensait donc que supprimer la cohésine des cellules déréglerait l'expression des gènes en modifiant le niveau d'activité de milliers d'entre eux. Comme prévu, l'expression de nombreux gènes a changé. Mais les changements sont restés assez faibles. Les boucles – du moins celles formées par extrusion – ne sont donc finalement pas des interrupteurs binaires. Elles semblent plutôt fonctionner comme des boutons qui augmentent ou diminuent un peu l'activité des gènes, ajustant avec précision l'approvisionnement d'une cellule en différentes protéines.

En d'autres termes, notre vision était trop simpliste. Peut-être même que la régulation des gènes n'est qu'un accessoire des boucles et que leur fonction principale reste à découvrir... Comme tout explorateur en territoire inconnu, nous avons besoin de cartes plus précises. Dans le cadre du projet *Encode* (Encyclopédie des éléments de l'ADN) des NIH, Yijun Ruan et moi-même travaillons avec nos collègues à la création du premier atlas des boucles du génome humain en les cartographiant dans les tissus humains. Nos équipes et nombre d'autres se sont aussi réunies au sein du consortium 4D Nucleome, qui développe de nouvelles méthodes pour s'attaquer à ces problèmes. Et Olga Dudchenko, chercheuse en postdoctorat au laboratoire, a créé le DNA Zoo – un consortium de laboratoires universitaires, de zoos et d'aquariums du monde entier qui rassemble les génomes de centaines d'espèces et retrace l'évolution des boucles dans l'arbre du vivant.

Pour les chercheurs, la fin d'une histoire scientifique est toujours le début d'une autre. Il y a deux milliards d'années, avant l'émergence du noyau cellulaire, le processus d'extrusion de l'ADN est apparu. Pourquoi? Qui sait, répondre à cette question permettra peut-être de boucler la boucle. ■

Bruneau et ses collègues ont montré qu'en interférant avec CTCF, on affaiblissait considérablement les boucles. Au Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), François Spitz et ses collègues ont obtenu un résultat similaire en éliminant une protéine connue pour déposer la cohésine sur l'ADN. À l'Institut néerlandais du cancer, l'équipe de Benjamin Rowland a observé que la suppression d'un facteur qui retire la cohésine de l'ADN conduisait à des boucles plus grandes, sans doute parce que la cohésine avait alors la possibilité de rester plus longtemps. Et, dans notre laboratoire, Suhas Rao a montré qu'en dégradant la cohésine elle-même, on éliminait en quelques minutes toutes les boucles associées.

Mais nous rêvions tous d'une confirmation directe: voir l'extrusion en action. C'est ce qu'ont fait, en avril 2018, Cees Dekker, de l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas, et ses collègues. En utilisant la condensine de la levure – un complexe protéique très proche de la cohésine –, ils ont réalisé un film que nombre de chercheurs du domaine n'oublieront jamais. La condensine atterrit sur un nœud d'ADN, formant un petit nodule d'ADN qui grandit et se développe jusqu'à ce que le spectateur comprenne ce qu'il est vraiment: une boucle extrudée.

DES BOUCLES ET DES MALADIES

Aujourd'hui, à mesure que les mécanismes de formation des boucles et leurs règles se précisent, l'importance de ces structures pour la santé et la compréhension des maladies devient de plus en plus claire. Par exemple, Frederick Alt, de l'université Harvard, et ses collègues ont commencé à expliciter leur rôle dans la production d'anticorps. Votre organisme produit des anticorps contre des agents pathogènes qu'il n'a jamais rencontrés auparavant en coupant et collant des fragments de gènes d'anticorps. L'équipe de Frederick Alt a montré que ce processus s'appuie sur l'extrusion de boucles: de

L'ESSENTIEL

Une seule espèce humaine a survécu, alors qu'il y a eu d'autres espèces. Les Néandertaliens avaient à peu près les mêmes capacités de survie qu'*Homo sapiens*.

> Pour expliquer pourquoi nous sommes devenus une espèce si avancée, une théorie avance qu'un processus de domestication particulièrement intense de notre espèce par elle-même

aurait rendu ses membres plus sociables et plus coopératifs que les autres espèces.

> Une plus grande sociabilité aurait permis le développement de traditions culturelles et de techniques assez avantageuses pour nous par donner le dessus à *H. sapiens*.

LES AUTEURS



BRIAN HARE
professeur d'anthropologie évolutionniste et de psychologie à l'université de la Colombie, aux États-Unis



VANESSA WOODS
chercheuse en anthropologie évolutionniste à l'université Duke

La sociabilité, clé du succès de «sapiens»

Pourquoi *Homo sapiens* a-t-il surpassé les autres espèces humaines ?

Pour être parce qu'un processus d'autodestication a favorisé l'apparition, chez nos ancêtres et leurs descendants, d'une plus grande sociabilité.

Nous sommes aujourd'hui les seuls humains sur Terre, mais il n'y a pas si longtemps, nous avions encore de la compagnie. Pendant les 300 000 ans ou plus de son existence, *Homo sapiens* a partagé la planète avec au moins quatre autres espèces humaines. Pourquoi notre espèce s'est-elle imposée tandis que les autres ont disparu ? C'est évident seulement si on se dit : parce que nos ancêtres étaient les meilleurs chasseurs, qu'ils étaient plus intelligents et qu'ils avaient plus de savoir-faire.

Ce n'est cependant qu'une histoire que nous aimons nous raconter. La réalité est que certaines des autres espèces étaient là depuis bien plus longtemps que nous – au moins un million d'années de plus –, que le cerveau néandertalien était aussi gros sinon plus que le nôtre, et que certains des savoir-faire de nos cousins humains étaient plus avancés que ceux de nos ancêtres.

Si un extraterrestre avait tenté il y a 100 000 ans de deviner quelle espèce humaine prendrait le dessus sur la planète, il aurait peut-être parié sur nos musculeux cousins

néandertaliens, espèce dont l'ancêtre commun à leur lignée et à la nôtre a vécu il y a quelque 600 000 ans. Ils ne le cédaient en rien à nos ancêtres s'agissant d'habileté à la chasse, puisqu'ils étaient capables d'abattre des mammoths, des aurochs et d'autres grands mammifères de leur époque. Ils avaient aussi une pensée symbolique puisqu'ils décoraient leurs corps de pigments et de parures faites de plumes, de coquillages et d'os. Comme nous, ils portaient le gène *FOXP2*, que l'on pense nécessaire à l'articulation de la parole. Ils soignaient aussi leurs blessés et, vers la fin de leur ère, ils se sont mis à enterrer leurs morts. Tout indique donc qu'ils égalaient, voire surpassaient, nos ancêtres dans l'art de survivre et de vivre dans la nature.

Il y a 13 000 ans, des Paléo-Indiens ont laissé ces signatures individuelles dans la grotte argentine de Cueva de las Manos. Sans doute pour témoigner de leur soumission à des règles sociales lors d'une cérémonie, supputent-on.

© Shutterstock.com/Peir Karachwila



> Qui plus est, à la comparer à celle de nos plus proches parents primates non humains – les bonobos et les chimpanzés –, la diversité génétique d'*Homo sapiens* apparaît très faible. Cette caractéristique suggère qu'au moins une fois, et à plusieurs reprises sans doute, la population *sapiens* est passée par ce que les démographes nomment un « goulot d'étranglement », c'est-à-dire que ses effectifs ont été très réduits, une situation proche de l'extinction. Puisque l'espèce n'était ni vraiment plus forte ni plus intelligente que ses concurrentes et qu'elle a même parfois frôlé l'extinction, pourquoi notre espèce a-t-elle fini par prendre le dessus ?

Peut-être parce que les *Homo sapiens* ont été les plus sociaux. Ce qui a rendu les *sapiens* capables de se développer toujours plus est une sorte de superpouvoir cognitif : la communication coopérative. En anthropologie et en psychologie, ce terme désigne les façons de communiquer tendant à faciliter la coopération. Tous les humains d'aujourd'hui sont des experts de cette sorte de communication avec d'autres humains. Nous sommes par exemple capables de communiquer avec quelqu'un que nous n'avons jamais vu et, malgré cela, de coopérer avec lui de façon à atteindre un objectif. Ce superpouvoir, nous le développons avant même de savoir marcher ou parler ; c'est la porte d'accès à la vie sociale et culturelle des humains. Grâce à lui, nous apprenons très tôt à nous connecter à l'esprit des autres afin de profiter du savoir transmis au fil des générations. Il est au fondement de toutes les formes de culture et d'apprentissage, notamment du langage.

UNE AUTODOMESTICATION DES HUMAINS

La communication coopérative s'est développée grâce à la domestication de notre espèce par elle-même. La domestication d'une espèce animale suppose une sélection intensive des traits favorisant la sociabilité. En plus de devenir nettement plus doux que ne l'est l'animal sauvage, un animal domestiqué présente plusieurs traits caractéristiques des effets de la domestication : morphologie de la face, taille des dents, pigmentation de parties du corps ou des poils, modifications hormonales, du cycle de reproduction, du système nerveux, etc. L'ensemble de ces traits, qui semblent indépendants les uns des autres, constitue le « syndrome de domestication ». Nous pensons que la domestication est un processus que nous avons fait subir à des animaux, mais nous-mêmes – ou plutôt les pressions sélectives qui s'exercent dans le cours de notre vie sociale – avons fait la même chose à notre espèce : nous nous sommes autodomestiqués.

La théorie d'une autodomestication des humains s'est développée au cours des vingt dernières années dans le cadre notamment de nos

travaux avec l'anthropologue Richard Wrangham, de l'université Harvard, et le psychologue Michael Tomasello, de l'institut Max-Planck à Leipzig. Ces recherches ont indiqué que les effets de cette autodomestication – nos capacités à communiquer de façon coopérative – ont augmenté le succès évolutif de notre espèce. La théorie prévoit que puisque l'*H. sapiens* de l'Holocène (les derniers 10000 ans) est manifestement autodomestiqué, nous devrions trouver des preuves de sélection vers la sociabilité au Pléistocène (2,6 millions d'années à 9700 ans avant notre ère). Certes, les comportements humains ne se fossilisent pas ; mais comme les neurohormones qui le régulent façonnent aussi notre squelette, il est possible de retracer le développement de l'autodomestication des humains en étudiant des squelettes anciens.

La communication coopérative est la porte d'accès à la vie sociale et culturelle

Par exemple, plus un individu est chargé en testostérone pendant sa puberté, plus son arcade sourcilière sera épaisse et son visage long. Les hommes ont tendance à avoir des arcades sourcilières plus épaisses, plus en surplomb et des visages légèrement plus longs que les femmes, ce qui nous fait naturellement ressentir qu'un visage présentant ces traits est masculinisé. La testostérone ne provoque pas directement l'agressivité humaine, mais son niveau et ses interactions avec d'autres hormones modulent le comportement agressif.

Or, ont remarqué les paléoanthropologues, tout au long du Paléolithique, les arcades sourcilières tendent à se réduire, les visages à se raccourcir et la tête à se rétrécir. Dans nos recherches, nous avons compris qu'en documentant ces changements physiologiques, on pourrait déterminer quand se sont produits les changements comportementaux associés.

Avec Steven Churchill et Robert Cieri, qui travaillaient à l'époque à l'université Duke, nous avons mis en évidence qu'au Pléistocène moyen, il y a plus de 80000 ans, notre espèce présentait des visages plus longs et des arcades sourcilières beaucoup plus fortes que ce n'est devenu le cas au Pléistocène >

L'AUTO-DOMESTICATION AU SEIN DU GENRE HOMO



Depuis la maîtrise du feu, il y a sans doute plus d'un million d'années, les veillées autour de cette source de chaleur sont l'occasion d'échanges qui contribuent à façonner la culture.

Depuis l'Antiquité, une vaste réflexion se poursuit afin de saisir ce que François de Laet (1596-1649) appelait les « habitudes », en son temps, nomma le « propre de l'homme ». Au XIX^e siècle, elle s'est intensifiée quand les anthropologues se sont penchés sur les singularités biologiques d'*Homo sapiens* et sur leur relation avec ses traits culturels. Dans cette quête, les découvertes archéologiques ont montré que quels traits biologiques et culturels humains sont présents depuis longtemps, voire sont antérieurs à l'émergence du genre *Homo* il y a plus de 2,8 millions d'années.

C'est le cas de la bipédie, qui, en libérant les mains, a enclenché l'évolution du cerveau. Or cette faculté a émergé sur deux précursseurs : elle est déjà présente il y a 7 à 4 millions d'années sous une forme non encore intégrale chez les australopithèques, puis il y a 4 à 1 millions d'années sous une forme proche de la nôtre chez les australopithèques. C'est aussi le cas du façonnage d'outils – un trait culturel considéré comme la première conséquence de la bipédie –, puisqu'avec des collègues, Sonia Harmand, du CNRS, a mis au jour des outils lithiques taillés il y a 3,3 millions d'années sur les berges du lac Turkana, au Kenya.

Ainsi, la culture aussi a précédé le genre *Homo*. Pourquoi ? Parce que, comme le soulignait déjà Aristote, « l'homme est un animal politique » ; en d'autres termes, un membre de la « cité », un membre du groupe. C'est bien pourquoi, depuis l'avènement de la théorie de l'évolution, la singularité sociale humaine – ce qui, au contraire de tous les autres primates, lui a fait développer des cultures complexes – est au cœur des préoccupations anthropologiques. D'où vient-elle ? Dans *De la variation des animaux et des plantes sous l'action de la domestication* (1868), Charles Darwin soulignait déjà que la domestication ne concerne pas seulement des plantes ou des animaux non humains, mais aussi les humains. Or, comme en atteste la comparaison du chien à son ancêtre sauvage le loup, la première des conséquences de la domestication est la réduction de l'agressivité.

Richard Wrangham, de l'université Harvard, avec d'autres chercheurs, a étudié

de la domestication de l'homme, il y a sans doute plus d'un million d'années, les veillées autour de cette source de chaleur sont l'occasion d'échanges qui contribuent à façonner la culture.

Sur le plan anatomique, les preuves de cela sont particulièrement solides si l'on se fonde sur les quatre caractéristiques retenues par les archéologues pour identifier un squelette d'animal domestiqué : masse corporelle réduite, face plus courte et dents moins volumineuses, crâne globulaire et faible dimorphisme sexuel. Une transformation que dans des travaux de 2014 auxquels a participé Brian Hare, Robert Cieri, alors à l'université Duke, a qualifiée de « processus de féminisation ».

La première conséquence de la domestication est la réduction de l'agressivité

Cette « féminisation » saute aux yeux si l'on compare les osselettes de l'homme de Cro-Magnon, vieux de 20 000 ans, avec les nôtres : moins grands que ces Européens du Gravettien (30 000 à 22 000 ans environ), nous avons un crâne 15 % moins volumineux, des reliefs osseux (sus-orbitaires, nucaux, mastoïdiens...) réduits et une face plus courte et plus gracile ; et elle saute encore plus aux yeux à nous comparer au plus ancien *Homo sapiens* connu : l'homme de Jebel Irhoud, daté de 300 000 ans environ. Bien visibles sur les fossiles qui nous sont parvenus, ces caractères osseux reflètent soit une baisse du niveau de testostérone circulant chez les adultes actuels, soit une baisse de la densité des récepteurs androgéniques. Quelle qu'en soit la cause, cette baisse traduit à son tour notre évolution vers une tolérance sociale accrue, au moins depuis le Pléistocène

(700 000 à 120 000 ans), mais qui pourrait être bien plus ancienne, puisque dans une collaboration avec Richard Wrangham, Brian Hare proposait en 2012 que l'évolution psychologique des bobobos vers moins d'agression intragroupe serait aussi caractéristique d'un processus d'autodomestication.

Les données montrent donc que la vie sociale a entraîné une domestication des espèces du genre *Homo*, laquelle s'est intensifiée au cours du Paléolithique supérieur (50 000 à 12 000 ans) chez *H. sapiens* et encore plus au cours des époques qui ont suivi. À cet égard, Charles Darwin a souligné dans *La Filiation de l'homme* (1871) que les pressions sociales s'opposent aux pressions environnementales, lorsque nous protégeons les faibles par exemple, mais aussi lorsque nous respectons un nombre croissant de règles qui, si elles se maintiennent assez longtemps, deviennent de véritables pressions sélectives. C'est dans cette « sélection culturelle » par la société humaine que les biologistes voient l'origine du syndrome de domestication. Brian Hare et Vanessa Woods la considèrent manifestement comme une forme de sélection naturelle existant au sein de la société, s'opposant à la sélection naturelle environnementale. D'autant plus intense que la société est complexe, elle a produit cet animal qui transporte partout sa puissante cognition sur deux pieds, jamais seul, et qui a recueilli l'héritage de toutes les autres espèces. Dans l'ouvrage *Dernières nouvelles de sapiens*, qui vient d'être réédité, nous racontons l'histoire de cette stupéfiante transformation. Nous expliquons notamment par quelles étapes la collaboration accrue, rendue possible par la lente baisse de notre agressivité, a conduit à des stratégies de coopération élaborées pour survivre d'abord, puis aménager, transformer et domestiquer toute la nature ensuite. Rien d'étonnant, dès lors, à ce que depuis deux décennies, les paléoanthropologues, et notamment la grande équipe de l'université Duke, portent une attention particulière à cette importante caractéristique que Brian Hare et Vanessa Woods nomment la « communication coopérative ».

SILVANA CONTEMI
CNRS-UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE

> supérieur. En moyenne, dans les crânes datant de moins de 80 000 ans, la saillie des arcades sourcilières est réduite d'environ 40% ; les visages se sont raccourcis de 10% et sont devenus 5% plus étroits que les crânes de plus de 80 000 ans. Bien que cette tendance ait varié au cours du temps, les visages des chasseurs-cueilleurs, puis ceux des agriculteurs modernes ont adopté des apparences plus graciles, ce qui traduit une diminution des taux de testostérone dans l'espèce humaine.

La sérotonine, une autre neurohormone, pourrait avoir favorisé une série de changements qui ont conduit à un cerveau plus petit et à moins d'agressivité. Les taux de sérotonine augmentent en effet tôt au cours du syndrome de domestication, alors que cette molécule pourrait jouer un rôle dans le développement crânien.

Des expériences de psychologie sociale portant sur les dilemmes moraux et la coopération montrent que les substances dont l'effet est d'augmenter la disponibilité de la sérotonine dans le cerveau – les inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine (ISRS) – rendent les gens plus coopératifs et moins agressifs. La sérotonine ne modifie pas seulement le comportement : y être exposé à un stade précoce du développement semble modifier aussi la morphologie du crâne. Les souris enceintes qui reçoivent des ISRS ont des petits dont le museau est plus court et plus étroit et un crâne décrit comme globulaire.

Parmi les espèces humaines, nous sommes justement les seuls à avoir un tel crâne. C'est-à-dire un crâne en forme de ballon. Les autres espèces ont le front bas et le crâne épaissi ; les Néandertaliens avaient une tête en forme de ballon de rugby. La forme haute et ronde de notre crâne serait liée à une augmentation de la disponibilité de la sérotonine au cours de l'évolution d'*H. sapiens*. D'après le registre fossile, ces changements ont débuté après que les lignées *sapiens* et *neanderthalensis* se sont séparées, puis se sont poursuivis jusqu'à un passé évolutif relativement récent. En fait, une étude menée par l'un d'entre nous (Brian Hare) avec Steven Churchill et Robert Cieri, de l'université Duke, suggère que le crâne *sapiens* – et donc la taille de notre cerveau – a diminué au cours des 20 000 dernières années.

Si les niveaux de testostérone et de sérotonine ont évolué chez *H. sapiens* au cours de son autodomestication, ce fut aussi le cas d'une autre molécule. Une baisse de la testostérone et une augmentation de la sérotonine renforcent les effets de l'hormone ocytocine sur le lien social. Pendant l'accouchement, les parturientes secrètent beaucoup d'ocytocine. Cette hormone facilite la lactation et elle est transmise au nourrisson par le lait. Le contact visuel entre les parents et les bébés crée une

boucle interactive d'ocytocine, ce qui stimule l'affection mutuelle. Une expérience réalisée par l'équipe du psychologue Carsten de Dreu, de l'université de Leyde, aux Pays-Bas, illustre les effets de l'ocytocine : après en avoir donné à inhaler aux participants, les chercheurs ont constaté qu'elle les rendait plus coopératifs, plus empathiques et plus confiants quand on les faisait participer à des jeux financiers et sociaux.

Or ces changements hormonaux ont eu des effets durables sur nos relations sociales. En fait, nous pensons qu'ils ont fait apparaître une nouvelle catégorie sociale : l'« étranger intragroupe ». Expliquons cette notion.

Nos cousins bonobos ou chimpanzés identifient les étrangers sur la seule base de la familiarité. Un individu vivant avec eux sur leur territoire fait partie du groupe ; tout autre individu est un étranger. La distinction est nette : soit un individu est familier, soit il s'agit d'un étranger. Les chimpanzés peuvent entendre ou voir leurs voisins, mais leurs interactions avec eux sont presque toujours brèves et hostiles ; les bonobos, en revanche, sont plus amicaux avec les étrangers.

Nous aussi avons différentes façons de réagir face à des individus non familiers, mais contrairement à toute autre espèce animale, nous pouvons reconnaître immédiatement si un inconnu appartient à notre groupe. Seuls les humains définissent leurs groupes en fonction de leurs apparences (ceux qui portent l'habit ou le chapeau traditionnels, etc.), de leur lan-



Les niveaux de la testostérone et d'autres neurohormones se sont modifiés

gage (langue ou façon de parler), ou d'un ensemble de croyances (appartenance religieuse ou partisane, etc.). Notre conception malléable de ce qui définit un groupe nous permet de reconnaître qui est des nôtres, en d'autres termes quelle personne inconnue jusque-là fait néanmoins partie du groupe, c'est-à-dire est un étranger intragroupe, même si nous ne l'avions jamais rencontré jusqu'ici. Cette faculté nous rend capables d'étendre



notre réseau social bien au-delà de ce qui est possible dans les autres espèces.

Chaque jour, sans le remarquer, nous nous parons d'une façon qui nous rend identifiables aux yeux des autres, que ce soit en portant un survêtement de sport, un pin's à thème politique, un symbole religieux, un collier, etc. La capacité à procéder ainsi domine notre vie quotidienne; elle nous pousse à accomplir toutes sortes d'actes altruistes, grands ou petits, depuis aider une personne âgée à traverser la rue jusqu'à faire don d'un organe à un inconnu. Elle nous pousse aussi à partager et à améliorer nos meilleures idées.

DEPUIS 80 000 ANS. UNE LUMIÈRE QUI RESTE ALLUMÉE

Même s'il semble que nos cousins néandertaliens aient eu certains avantages sur nous, il y a environ 80 000 ans, des indices du succès futur d'*H. sapiens* ont commencé à apparaître. Dès l'apparition de notre espèce dans le registre fossile d'Afrique datant de 300 000 ans, des indices de techniques avancées, dont l'émergence suppose une certaine complexité sociale, se font jour. Toutefois, nous pouvons les comparer à des lumières clignotant et s'éteignant dans la nuit. Des techniques avancées et d'autres signes de progrès apparaissent ensuite et disparaissent, mais après la date de 80 000 ans, ces lumières semblent rester allumées puis se renforcer lentement. D'après nous, les étrangers intragroupe se sont multipliés au sein de notre espèce à partir de cette époque, car le registre fossile suggère que des

La tendance humaine à établir des réseaux sociaux a atteint

des proportions vertigineuses. *Homo sapiens*: ici, le rassemblement autour du chef de leur foi de milliers de jeunes catholiques qui ne se sont jamais vus se déroule sans heurts parce que tous appliquent les mêmes règles sociales, celles que prescrit leur culture religieuse commune.

traditions culturelles et des technologies plus complexes ont alors commencé à se répandre sur de longues distances. Les réseaux sociaux étaient en expansion et ont permis de partager plus vite un grand nombre d'innovations culturelles, ce qui n'a pu qu'accélérer la complexification culturelle.

À partir de 50 000 ans, partout où *H. sapiens* était présent, notre espèce a laissé de plus en plus de traces de l'existence de réseaux sociaux en expansion et de prouesses culturelles. On a par exemple retrouvé des parures façonnées à partir de coquillages marins à des centaines de kilomètres à l'intérieur des terres, ce qui implique qu'un objet sans valeur pratique valait la peine d'être transporté sur une telle distance ou avait été échangé avec quelqu'un ayant voyagé sur l'une des premières routes commerciales. Nos ancêtres étaient aussi devenus capables de peindre des animaux sur des parois rocheuses en profitant avec habileté de leurs contours afin de leur donner du relief.

L'idée que la sociabilité a conduit à notre succès évolutif n'est pas nouvelle. Celle que nous serions devenus plus intelligents en tant qu'espèce ne l'est pas non plus. Notre apport réside dans la relation entre les deux idées: c'est une augmentation de la tolérance sociale qui a conduit à des changements cognitifs d'*H. sapiens*, en particulier ceux liés à la communication coopérative.

L'avènement de l'autodomestication humaine aurait entraîné à la fois l'augmentation de la population et la révolution technique que nous constatons dans le registre archéologique. Une capacité accrue à vivre ensemble aurait été le moteur de ces changements, car elle a connecté les groupes d'innovateurs entre eux d'une manière absente chez les autres espèces humaines. L'autodomestication nous a dotés d'un superpouvoir qui, en un clin d'œil à l'échelle de l'évolution, nous a donné le contrôle du monde. Et une à une, toutes les autres espèces humaines ont disparu.

Cette vision positive de notre espèce semble en contradiction avec la misère et la souffrance que nous nous infligeons les uns aux autres. Si l'autodomestication humaine explique le meilleur en nous, explique-t-elle aussi le pire? Comment concilier notre bonté et notre cruauté?

Certains des mêmes changements neuro-hormonaux qui sous-tendent la socialité augmentée favorisent aussi la plus horrible des violences. L'ocytocine, qui semble être un élément essentiel du comportement parental, est aussi appelée l'«hormone des câlins». Mais il nous semble plus approprié de la qualifier d'«hormone de la mère ourse». La même ocytocine qui emplit une mère à l'arrivée de son nouveau-né nourrit la rage qu'elle ressent lorsque quelqu'un menace son petit. Ainsi, >

> lorsqu'on donne un supplément d'ocytocine à une mère hamster, elle devient plus susceptible d'attaquer et de mordre un mâle menaçant. L'ocytocine joue aussi un rôle dans certaines formes comparables d'agression masculine. La quantité d'ocytocine disponible augmente lorsqu'un rat mâle se lie avec sa compagne. Il est plus attentionné envers elle, mais aussi plus susceptible d'attaquer un étranger qui la menace. Ce lien entre socialité, ocytocine et agressivité s'observe largement chez les mammifères.

Comme notre espèce a été façonnée par l'autodomestication, notre sociabilité accrue a aussi engendré une nouvelle forme d'agressivité. La plus grande disponibilité de la sérotonine pendant la croissance du cerveau humain a augmenté son impact sur notre comportement. Les membres d'un groupe avaient désormais la capacité de se connecter les uns aux autres si fortement qu'ils se sentaient comme les membres d'une même famille. Une nouvelle façon de s'inquiéter du sort d'autrui a précédé de la volonté farouche de défendre violemment les membres du groupe sans lien de parenté avec nous. Les humains sont devenus plus violents lorsque les membres de leurs groupes, qu'ils tendaient désormais à aimer davantage, étaient menacés.

DES CONTACTS POUR APAISER LES CONFLITS ENTRE GROUPES

Malgré les paradoxes évolutifs de la nature humaine, la notion d'appartenance à un groupe est malléable. *H. sapiens* a déjà démontré sa capacité à étendre le concept d'appartenance à un ensemble incluant des milliers ou des millions de personnes. Il peut être étendu davantage. La meilleure façon d'apaiser les conflits entre groupes est de diminuer le sentiment de menace perçu par le biais de l'interaction sociale. Si le fait de se sentir menacé nous donne envie de protéger les membres de notre groupe, un contact non menaçant avec des membres d'un autre groupe nous permet de changer la définition du nôtre afin de les y inclure.

Citons, à titre d'exemple, le cas des enfants blancs qui, dans les États-Unis, des années 1960, ont côtoyé des enfants noirs à l'école. Ce sont justement eux qui, devenus adultes, sont les plus susceptibles d'accepter l'idée de mariages entre Blancs et Noirs, d'avoir des amis et des voisins noirs. Bref, les Noirs font partie de leur groupe, qui cesse d'être défini par la couleur de la peau.

Ce phénomène joue un grand rôle dans le domaine de l'éducation. À l'université de Californie à Los Angeles, des étudiants de couleurs de peau différentes partageant une chambre ont déclaré lors d'une enquête être devenus plus à l'aise lors de leurs interactions

Notre sociabilité accrue a aussi engendré une nouvelle forme d'agressivité

avec des gens d'une autre ethnicité que la leur et approuver les relations amoureuses entre personnes de couleurs de peau différentes. Une étude a montré qu'imaginer un contact positif avec l'un des groupes de personnes les plus déshumanisés, les sans-abri, aide à éprouver de l'empathie envers eux. Les amitiés entre personnes appartenant à différents groupes peuvent se généraliser et s'étendre aux autres membres du groupe.

La plupart des politiques sont promulguées en partant du principe qu'un changement d'attitude entraîne un changement de comportement, mais lors de conflits entre groupes, c'est le changement de comportement dans les contacts humains qui fait évoluer les esprits. L'hypothèse de l'autodomestication explique pourquoi notre espèce a évolué vers une plus grande sociabilité. Le contact entre des personnes d'idéologies, de cultures ou de couleurs de peau différentes rappelle de façon universellement efficace qu'au fond, nous appartenons tous à un même groupe, celui d'*H. sapiens*.

C'est notre sociabilité augmentée qui explique que nous ayons supplanté les autres espèces de la lignée des hominines. En termes évolutifs, cette hypersociabilité se traduit par tous les comportements positifs, intentionnels ou non, que nous avons à l'égard des autres. Malgré l'augmentation de la taille du groupe, ils rendent possible une bien plus grande proximité physique grâce à notre capacité à très rapidement lire les intentions des gens. Les effets de nos interactions sociales sont ainsi intensifiées sur le succès évolutif de notre espèce – notamment la capacité à résoudre collectivement des problèmes mieux que ne peuvent le faire des individus seuls – sont révélés si bénéfiques qu'ils ont modulé le façonnage de notre corps et de notre esprit par la sélection. La capacité à partager des connaissances entre les générations qui en résulte a produit la technologie et la culture qui nous ont permis de nous multiplier et de peupler la planète. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Hare, **Survival of the nicest: How *Homo sapiens* evolved via selection for prosociality**, *Annual Review of Psychology*, vol. 68, pp. 155-186, 2017.

R. Cieri et al., **Craniofacial remodeling, social tolerance, and the origins of behavioral modernity**, *Curr. Anthropol.*, vol. 55, pp. 435-436, 2014.

B. Hare et V. Woods, **The Genius of Dogs: How Dogs are Smarter than You Think**, Dutton, 2013.

B. Hare et al., **The self-domestication hypothesis: Evolution of bonobo psychology is due to selection against aggression**, *Animal Behaviour*, vol. 83(3), pp. 573-585, 2012.

P. Jouventin, **La domestication du loup**, *Pour la Science*, n° 473, décembre 2012.

R. Wrangham, **Comparative rates of aggression in chimpanzees and humans**, *Primates*, vol. 47, pp. 14-26, 2006.

H. Leach, **Human domestication reconsidered**, *Curr. Anthropol.*, vol. 44, pp. 349-368, 2003.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS
DURABLE. PLUS D'INFORMATIONS SUR
LE RECYCLAGE SUR
TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

L'intelligence artificielle au service du réseau électrique

L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage permet non seulement de repérer des dégâts sur le réseau de distribution moyenne et basse tension géré par Enedis, mais aussi d'identifier les portions à risques et anticiper les pannes.

Gent dix mille kilomètres, soit presque trois fois le tour de la Terre : chaque année, Enedis contrôle un tiers de son réseau électrique moyenne tension (entre 1 kV et 50 kV) à pied, en hélicoptère ou par drones et donne lieu à des milliers de prises de vues, explique Guillaume Langlet, chef du Département Expertise et Relations Fournisseurs Matériels d'Enedis. Il s'agit de repérer des poteaux endommagés ou envahis par la végétation, des attaches de ligne usées, un transformateur défectueux, un isolateur brisé... Une centaine d'anomalies possibles donnent ainsi lieu chaque année à plus de 10 000 interventions destinées à prévenir tout risque de coupures. Enedis développe, exploite et modernise le réseau électrique moyenne tension (nommé HTA, pour haute tension selon la réglementation française), soit 650 000 km dont 322 000 km en aérien, et

également le réseau basse tension (BT), 725 000 km, dont 390 000 km en aérien.

Les lignes HTA représentent un enjeu particulier, car elles desservent davantage de clients. Elles forment en quelque sorte les « routes nationales » du réseau, les lignes BT figurant les « voies communales ». Aujourd'hui, les défauts sont repérés grâce à l'œil exercé des agents. Mais Enedis s'est engagé dans un programme de R&D afin de systématiser la reconnaissance des anomalies sur image, à l'aide de l'intelligence artificielle.

« Pour cela, nous avons recours à des algorithmes d'apprentissage supervisés pour la reconnaissance d'images », explique Cécile Dondé, cheffe du projet MAP (Maintenance Prévisionnelle des Réseaux Électriques). Il en existe déjà beaucoup, mais il faut choisir les plus pertinents, les adapter et savoir les entraîner avec des bases de données adéquates. Parmi les plus connus de ces algorithmes « apprenants », on

trouve le type Random Forest, dont le principe consiste à bâtir un arbre de probabilité en fonction de divers paramètres propres au domaine étudié. « L'algorithme construit lui-même son arbre qui peut comporter de très nombreuses ramifications », reprend Cécile Dondé. Et il évolue pendant la phase d'entraînement, du fait de sa capacité à apprendre. Pour cela, nous allons d'abord lui indiquer ce qu'il voit sur les images afin qu'il soit en mesure d'identifier les différentes parties du réseau : poteau, lignes, isolateurs... Ensuite, nous lui montrons des photos d'anomalies. Une fois au point, l'algorithme devra comparer un élément présent sur le nouveau cliché avec le même en bon état, déterminer la probabilité qu'il soit endommagé, et enfin proposer d'intervenir. Pour reconnaître les constituants du réseau HTA, l'algorithme dispose de deux critères : la forme et la couleur. Soit un grand nombre de configurations, car les



photographies peuvent être prises sous des angles différents et des luminosités variables. Par ailleurs, un poteau envahi de lichen n'aura pas la même couleur qu'un neuf. La lecture des images par l'algorithme est d'autant plus délicate. Et si certaines anomalies sont évidentes, comme un poteau penché, ou un isolateur brisé, d'autres sont plus subtiles. Par exemple, les anneaux qui portent les lignes HTA s'usent sous l'effet des frottements dus au vent. Neufs, ils mesurent 15 mm de diamètre. Ils doivent être changés lorsqu'ils n'en font plus que 5.

UNE DÉTECTION FIABLE

Détecter de si faibles écarts sur un cliché pris à une dizaine de mètres au moins est une gageure. « Pour parvenir à des résultats satisfaisants, nous devons bâtir une banque d'images exhaustive, comme Cécile Dondé. Actuellement, nous entraînons notre algorithme avec 10 000 images. Mais certaines anomalies rares ne sont pas bien documentées, il faut donc toujours compléter. Cela prend du temps. »

Afin de tester la faisabilité d'un tel projet, Enedis, avec le support de la direction R&D d'EDF, a organisé en 2019 un challenge

Nous entraînons notre algorithme avec 10 000 images. Mais pour documenter les anomalies rares, il faut toujours compléter.

SAIRA (Système d'Analyse d'Images Réseau Automatisé) avec des fabricants de drones, des start-up ou des PME spécialisées dans l'intelligence artificielle, et des grands industriels. Les compétiteurs devaient examiner un jeu d'images comportant 30 sortes d'anomalies différentes. Les meilleurs ont relevé jusqu'à 70 % d'un type de défaut spécifique (par exemple, 70 % des lignes sectionnées présentes dans l'échantillon). Un résultat suffisamment bon pour être utilisé en appui opérationnel, même si l'objectif fixé par Enedis est une détection de 95 % des occurrences, pour chaque catégorie d'anomalie.

Un nouveau challenge sera organisé en 2021, ce qui permettra de mesurer les progrès réalisés. Le projet, commencé il y a trois ans, pourrait aboutir d'ici à 2025. « Détecter 95 % des occurrences est un objectif élevé, conclut Cécile Dondé. D'autant plus qu'Enedis souhaite minimiser les fausses alarmes, ce qui nécessite un réglage délicat de la sensibilité. Nous obtenons d'ores et déjà des résultats satisfaisants quant à la reconnaissance des divers éléments du réseau. Il nous reste à progresser sur l'identification des anomalies. »

Aussi performant soit-il, un logiciel de reconnaissance d'images ne pourra qu'analyser celles prises lors des campagnes

DU COURANT. OUI. MAIS DE QUALITÉ...

Enedis n'a pas seulement la charge d'apporter

le courant à ses clients, il doit aussi veiller à sa qualité. «C'est ce que l'on appelle la "qualité de l'onde" ou "qualité de tension"», explique Kevin

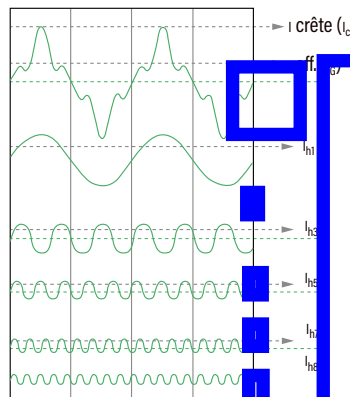
Lorenzo, ingénieur-chercheur au département MIRE (Mesures et Systèmes d'Informations des Réseaux Électriques). L'onde parfaite est une sinusoïde d'amplitude 230 V, et d'une fréquence de 50 Hz. Mais les nouveaux usages, notamment tout ce qui transforme le courant alternatif en courant continu (chargeurs de téléphone portable, lampe LED) génère un "bruit" parasite qui se superpose au signal initial. La sinusoïde se retrouve déformée. » L'application d'une transformée

de Fourier permet de visualiser directement ces perturbations, l'onde étant décomposée en sa fondamentale (la sinusoïdale initiale non déformée) et une série de sinusoïdes de plus faibles amplitudes, les harmoniques responsables des perturbations (cf. schéma). «Pour une tension fournie de qualité, la somme des amplitudes des harmoniques (appelée "taux de distorsion harmonique totale" ou THD) ne doit pas dépasser 8% de l'amplitude de la fondamentale», précise Florian Couronne, également ingénieur-chercheur au département MIRE. Car ces harmoniques engendrent des courants parasites qui chauffent les composants électroniques des usagers, ce qui peut mener à une casse du matériel. »

FILTRE ANTIHARMONIQUE

Au niveau de chaque équipement électronique des normes d'application obligatoire limitent l'amplitude de chaque courant harmonique de manière à limiter le THD induit sur le réseau à moins de 8%. Sauf que ces normes ne sont pas toujours respectées. Il existe aussi des solutions locales, comme l'application de filtres antiharmoniques, mais c'est du cas par cas...

Total

Fondamental
50 HzHarmonique
3 (150 Hz)Harmonique
5 (250 Hz)Harmonique
7 (350 Hz)Harmonique
9 (450 Hz)

«Il faut aller sur site, trouver la source de la perturbation, et appliquer un filtre antiharmonique spécifique», détaille Kevin Lorenzo. C'est donc très ponctuel. »

Pour l'instant, les éléments perturbants sont en général de faible puissance et n'occasionnent que rarement des THD élevés. Mais cela va

**Panneaux photovoltaïques,
voitures électriques
et pompes à chaleur sous
la surveillance de 17**

potentiellement changer avec le développement de trois types d'équipements contenant de l'électronique de puissance : les panneaux photovoltaïques, les voitures électriques et les pompes à chaleur. Avec des puissances de l'ordre du kilowatt, ils occasionneront des perturbations plus conséquentes. Comment vont-elles se répartir sur les 800 000 réseaux basse tension disséminés sur tout le territoire ? Estimer le THD par réseau

demanderait un grand nombre de simulations.

Pour chacun, il existe une trentaine de paramètres (nombre de clients desservis, longueur des câbles, puissance du transformateur...) qu'il faut mettre en regard avec le taux de pénétration supposé de ces différents équipements jusqu'en 2035, horizon fixé par Enedis. Impossible de procéder de la sorte avec les 800 000 réseaux, d'autant plus qu'il faut considérer plusieurs scénarios de développement. Cela prendrait des dizaines d'années de simulation. D'où l'idée de recourir à l'intelligence artificielle pour optimiser ces calculs.

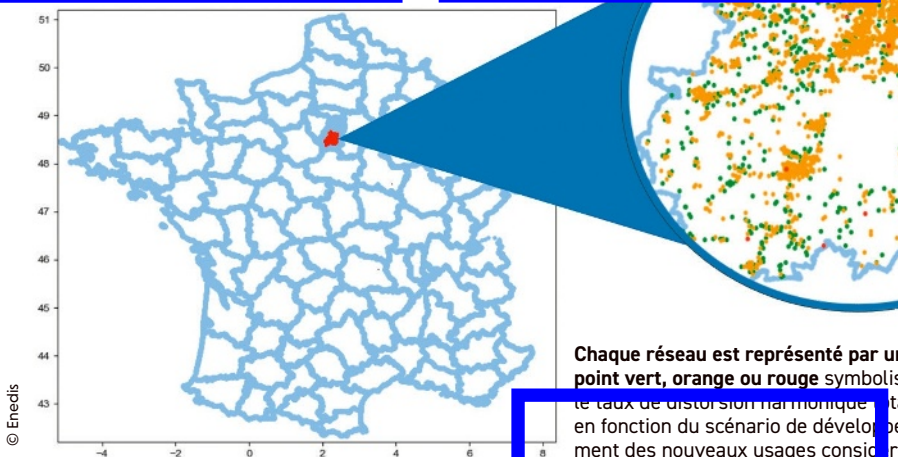
RÉGULARISATION DE TIKHONOV

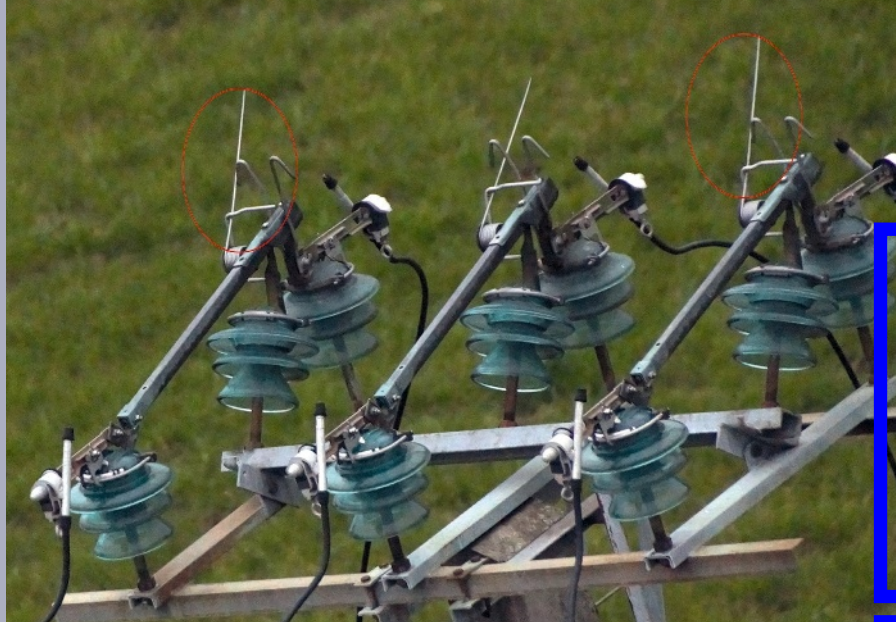
«La première étape a consisté à lister tous les paramètres réellement influents sur les harmoniques», détaille Florian Couronne. Ensuite, nous avons élaboré une base d'apprentissage de 20 000 réseaux représentative pour des études harmoniques de ce que l'on peut trouver sur le territoire. Puis nous avons modélisé le comportement de ces réseaux grâce à un algorithme de type Machine Learning, avec des scénarios prenant en compte divers taux de pénétration des équipements. Nous sommes ainsi parvenus à mettre au point un algorithme final, un cœur de calcul, capable d'estimer le THD de n'importe lequel des 800 000 réseaux, en fonction d'une dizaine de paramètres seulement, et du taux de pénétration envisagé. » Pour la mise au point du cœur de calcul proprement dit, les ingénieurs ont passé au crible les différentes solutions existantes : réseaux de neurones, arbres de décisions, régressions à vecteurs de support... Ils ont choisi finalement un type hybride, conjuguant plusieurs des modèles ci-dessus, et utilisant une «régularisation de Tikhonov».

Le résultat final se présente sous la forme d'une «carte de France du risque harmonique» (cf. illustration ci-contre), où l'état de chaque

réseau apparaît selon un code couleur. L'entreprise sera alors à même d'ajuster la localisation et l'échéance de ses investissements pour renforcer le réseau. Une première mouture a été élaborée cette année, encore imparfaite. «Quelques paramètres de modélisation sont à revoir», conclut Florian Couronne. Il est notamment très compliqué de modéliser le comportement des véhicules électriques, car il en existe de toutes les sortes, de toutes les marques... » Une fois ces derniers réglages effectués, le logiciel final devrait être disponible courant 2021.

Chaque réseau est représenté par un point vert, orange ou rouge symbolisant le taux de distorsion harmonique total, en fonction du scénario de développement des nouveaux usages considérés.





Au sommet de ce poteau, deux des trois fouets constituant ces interrupteurs aériens sont sortis de leur logement. L'algorithme doit les distinguer de celui du milieu, resté en place.

HTA... «Le problème est très différent puisque cela concerne de l'aérien», reprend Odilon Faivre. Jusqu'à présent, les modèles traitaient des câbles enterrés dont les faiblesses dépendent surtout de leurs caractéristiques propres. Avec l'aérien, les faiblesses sont aussi exogènes et concernent la météo, la végétation, le type de terrain. Une simple adaptation de ce qui se fait sur des portions enterrées ne suffit plus, il faut revoir le modèle en profondeur.»

FIXER DES PRIORITÉS EN FONCTION DE L'HABITAT

L'étape clé consiste là encore à décrire avec précision les conditions de vie du câble, en fonction de cet environnement aérien. Pour cela, il existe de nombreuses bases de données, la plupart du temps en libre accès. «Les données IGN fournissent l'altitude des câbles, et donc la présence de zones escarpées par exemple. La base CORINE Land Cover, un inventaire biophysique de l'occupation des sols et de son évolution, indique si le câble traverse une zone de forêt, ou une zone agricole. Enfin, les données météo permettent de savoir s'il subit régulièrement des orages ou des tempêtes.» Ces données sont ensuite juxtapuées à celles intrinsèques au câble : son type, son âge, les incidents passés. Au final, on retrouve là encore un grand nombre de variables internes et externes : 500, le réseau de 322 000 km étant lui-même divisé en 200 000 portions. En prenant en compte tous ces éléments, l'algorithme doit être capable de prévoir les câbles à changer en priorité, tout en donnant des indications précises sur les portions les plus fragiles afin de limiter les remplacements inutiles. Il tiendra compte aussi du nombre de foyers desservis par les lignes en question afin de fixer des priorités, certaines lignes desservant moins de 200 foyers, d'autres plus de 5 000. Le projet pourrait aboutir dès l'année prochaine. Reste un dernier point : transmettre cet outil aux équipes sur le terrain. «Il y a un travail de pédagogie à faire, souligne Odilon Faivre. Car l'intelligence artificielle est un terme abstrait. Cela peut ressembler à une boîte noire dont on ne comprend pas le fonctionnement. Alors qu'après tout, cela reste des mathématiques, où l'on tente de faire passer une droite par un maximum de points, pour simplifier. Je passe donc du temps avec les équipes chargées de la maîtrise d'ouvrage afin de leur expliquer en quoi consiste cet outil et comment il les aidera au quotidien.»

► d'inspection annuelles, soit un tiers des 322 000 km de réseau aérien HTA. Comment éviter qu'une panne ne se produise sur les deux tiers restants ? Là encore, l'intelligence artificielle a un rôle à jouer, non plus seulement pour repérer les défauts, mais pour les prévenir dans le cas particulier des ruptures de lignes. Tout comme dans le film *Minority Report*, les autorités arrêtent les criminels avant qu'ils ne commettent leur méfait : les techniciens seraient informés des portions de lignes fragiles avant qu'elles ne cèdent, sans inspection préalable. Dans ce domaine, Enedis ne part pas de zéro. L'entreprise utilise déjà ce principe d'anticipation sur d'autres types d'installations. «Le premier cas d'usage a été la détection des départs basse tension accidentogènes en 2016», explique Odilon Faivre, chef de projet R&D et Innovation à Enedis. Un départ basse tension correspond à un câble de sortie d'un transformateur. En ville, ce câble peut desservir jusqu'à 100 foyers, et mesurer une centaine de mètres. La France en compte 2 millions, dont 1,6 million comportant des portions enterrées. «Nous avons cherché à repérer les départs souterrains ayant un défaut interne, qui relève du vieillisse-

ment du câble et non d'un arrachage par exemple», reprend Odilon Faivre. Avec des algorithmes d'apprentissage automatique, nous regardons une année donnée et nous nous sommes intéressés à ce qui s'est passé. Par exemple, en 2018, quels départs ont eu un accident ? De quel type ? Est-ce qu'il y a des câbles voisins ? L'environnement est-il humide ? Y a-t-il eu des travaux à proximité ? On peut recenser jusqu'à 500 variables explicatives. C'est ainsi que l'algorithme apprend, en étudiant la vie d'un câble sur les neuf dernières années. Ensuite, il est capable de donner une probabilité d'incident sur un départ nouvellement introduit dans sa base, en fonction de ses paramètres propres. «L'enjeu était de parvenir à gérer un grand volume de données, vu le nombre de départs BT et de variables. Mais grâce à cela, nous sommes passés d'un raisonnement par moyenne, selon l'âge et la technologie du départ, à un diagnostic individualisé. La méthode de ciblage permet d'identifier précisément des zones de réseau au moins neuf fois plus accidentogènes que la moyenne.» Ce modèle a ensuite été adapté aux 30 000 départs HTA en 2020, avec succès. D'où l'idée de le transférer non plus aux seuls départs, mais à l'ensemble des lignes

**L'algorithme doit être capable
de prévoir les câbles à changer
en priorité et d'optimiser
les remplacements**

L'ESSENTIEL

Le produit intérieur brut (PIB) est presque universellement utilisé pour évaluer la situation économique d'un pays.

> La crise financière de 2008-2009 a mis en évidence la nécessité de trouver de meilleurs moyens de mesurer la qualité d'une économie et le bien-être d'une société.

> Diverses équipes de chercheurs ont conçu des « tableaux de bord » de plusieurs indicateurs quantitatifs, pour aider à orienter les sociétés vers l'avenir que souhaitent leurs citoyens.

> Plusieurs pays ont commencé à intégrer ces marqueurs dans leurs processus décisionnels.

L'AUTEUR



JOSEPH STIGLITZ
professeur d'économie à l'université Columbia, à New York, colauréat en 2001 du prix de sciences économiques décerné en mémoire d'Alfred Nobel

PIB

Un indicateur très insuffisant

À force de se focaliser sur un seul indicateur économique, le produit intérieur brut, ou PIB, de nombreux pays ont vu la santé et le bien-être de leurs habitants, ainsi que l'environnement, se détériorer. Par quoi faudrait-il compléter ce chiffre pour mesurer ce qui compte vraiment ?

Depuis la Seconde Guerre mondiale, la plupart des États dans le monde ont commencé à utiliser le produit intérieur brut, ou PIB, comme mesure de base de leur prospérité. Le PIB mesure la production marchande : c'est la valeur monétaire de tous les biens et services produits dans une économie au cours d'une période donnée, généralement un an. Des gouvernements peuvent tomber si ce chiffre baisse, et il n'est donc pas surprenant que l'on s'efforce de le faire augmenter. Mais s'efforcer de faire croître le PIB n'est pas la même chose que d'assurer le bien-être d'une société.

En vérité, comme l'a dit le sénateur américain Robert Kennedy, «le PIB mesure tout sauf ce qui fait que la vie vaut la peine d'être vécue». Ce chiffre ne mesure pas la santé de la population, son niveau d'instruction, l'égalité des chances, l'état de l'environnement ou de nombreuses autres dimensions de la qualité de la

vie. Il ne mesure même pas des aspects cruciaux de l'économie tels que sa durabilité, c'est-à-dire si elle se dirige ou non vers un krach.

Mais ce que nous mesurons a de l'importance, car cela guide nos actions. Aux États-Unis, nous avons eu une idée de ce lien de cause à effet pendant la guerre du Vietnam, avec l'accent mis par l'armée sur le décompte hebdomadaire de soldats ennemis tués. Le recours à cette mesure morbide a conduit les forces américaines à entreprendre des opérations qui n'avaient d'autre but que d'augmenter le nombre de morts dans le camp adverse. Comme un ivrogne qui cherche ses clés sous le réverbère (parce que c'est là que se trouve la lumière), l'accent mis sur le nombre de morts nous a empêchés de comprendre le tableau d'ensemble : le massacre incitait plus de Vietnamiens à rejoindre le camp ennemi que les forces américaines n'en tuaient.

Aujourd'hui, un décompte de morts différent – celui du Covid-19 – se révèle être une



mesure horriblement bonne de la performance sociale. Il n'a que peu de rapport avec le PIB.

Les États-Unis sont le pays le plus riche du monde, avec un PIB de plus de 20000 milliards de dollars en 2019, chiffre qui suggère que nous disposons d'un moteur économique très efficace, une voiture de course qui pourrait surpasser n'importe quelle autre. Mais en juin 2020, les États-Unis avaient enregistré plus de 100000 décès du Covid-19, alors que le Vietnam, par exemple, avec un PIB de 26 milliards de dollars (à peine 4% du PIB américain par habitant) n'en avait aucun.

En fait, l'économie américaine ressemble davantage à une voiture ordinaire dont le propriétaire a économisé de l'essence en retirant la roue de secours, ce qui fonctionnait bien jusqu'à ce qu'il y ait une crevaison. La «pensée PIB», qui consiste à chercher à augmenter le PIB dans l'espoir que cela seul améliorerait le bien-être, nous a conduits à cette situation difficile. Une économie qui utilise ses ressources de façon plus efficace à court terme a un PIB plus élevé au cours du trimestre ou de l'année. Chercher à maximiser cette mesure macroéconomique se traduit, au niveau microéconomique, par une réduction des coûts de chaque entreprise afin d'obtenir les bénéfices le plus élevés possible à court terme. Mais une telle orientation à courte vue compromet nécessairement les performances de l'économie et de la société à long terme.

Le secteur américain des soins de santé, par exemple, était fier d'utiliser efficacement les lits d'hôpitaux: aucun lit ne restait inutilisé. En conséquence, lorsque le virus SARS-CoV-2 a atteint les États-Unis, il n'y avait que 2,8 lits d'hôpital pour 1000 habitants, bien moins que dans d'autres pays développés, et le système n'a pas pu absorber la soudaine augmentation du nombre de patients.

La suppression des jours de congé maladie payés dans les usines de conditionnement de la viande a permis d'augmenter les bénéfices à court terme, ce qui a également fait augmenter le PIB. Mais les ouvriers ne pouvaient pas se permettre de rester à la maison lorsqu'ils étaient malades; ils venaient plutôt travailler et contribuaient à propager l'épidémie.

De même, la Chine a fabriqué des masques de protection moins chers que ceux produits par les États-Unis, de sorte que leur importation a augmenté l'efficacité économique de notre pays et son PIB. Cela signifie toutefois que lorsque la pandémie a frappé et que la Chine a eu besoin de beaucoup plus de masques que d'habitude, le personnel hospitalier américain n'a pas pu en obtenir suffisamment.

En résumé, la volonté implacable de maximiser le PIB à court terme a détérioré les soins de santé, a provoqué une insécurité financière et physique et a réduit la durabilité et la

> résilience de l'économie, laissant les citoyens des États-Unis plus vulnérables aux chocs que les citoyens d'autres pays.

La superficialité de la pensée PIB était déjà évidente dans les années 2000. Au cours des décennies précédentes, les économistes européens, constatant le succès des États-Unis dans l'augmentation du PIB, avaient encouragé leurs dirigeants à suivre des politiques économiques à l'américaine. Mais alors que les signes de détresse du système bancaire américain se sont multipliés en 2007, le président français Nicolas Sarkozy s'est rendu compte que tout gouvernement qui cherchait à faire augmenter le PIB en négligeant les autres indicateurs de la qualité de vie risquait de perdre la confiance du public. En janvier 2008, il m'a demandé de présider une commission internationale sur la mesure des performances économiques et du progrès social. Un groupe d'experts devait répondre à cette question : comment les États peuvent-ils mieux mesurer leurs performances ? Mesurer ce qui fait que la vie vaut la peine d'être vécue, raisonnait Nicolas Sarkozy, était un premier pas essentiel pour l'améliorer.

Par coïncidence, notre rapport initial de 2009, intitulé de façon provocatrice *Mismeasuring Our Lives: Why GDP Doesn't Add Up* («Mal mesurer nos vies : pourquoi le PIB n'a pas de sens»), a été publié juste après que la crise financière mondiale avait démontré la nécessité de revoir les principes fondamentaux de l'orthodoxie économique. Il a rencontré un écho si positif que l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique), organisme au service de trente-sept pays développés, a décidé de suivre en constituant un groupe d'experts.

Après six années de consultations et de délibérations, nous avons renforcé et amplifié notre conclusion antérieure : le PIB doit être détrôné. À sa place, chaque État devrait utiliser un «tableau de bord» – un ensemble limité d'indicateurs chiffrés qui l'aideraient à s'orienter vers l'avenir souhaité par ses citoyens. En plus du PIB lui-même, en tant que mesure de l'activité marchande (et rien de plus), ce tableau de bord devrait inclure des paramètres relatifs à la santé, à la durabilité et à toute autre valeur à laquelle les citoyens du pays aspirent, ainsi qu'aux inégalités et à l'insécurité et aux autres maux qu'ils cherchent à réduire.

Ces documents ont contribué à cristalliser un mouvement mondial en faveur de nouvelles mesures de la santé sociale et économique. L'OCDE a adopté cette approche dans son *Initiative du vivre mieux*, fondée sur un tableau de bord à onze dimensions. Un indicateur synthétique, l'Indicateur du vivre mieux, fournit aux citoyens une façon de pondérer spécifiquement ces dimensions, afin de construire un indice qui mesure la performance

de leur pays sur la base des aspects qui leur tiennent le plus à cœur. La Banque mondiale et le Fonds monétaire international (FMI), qui étaient traditionnellement de fervents partisans de la pensée PIB, s'intéressent désormais également à l'environnement, aux inégalités et à la durabilité de l'économie.

Quelques pays ont même intégré cette approche dans le cadre de l'élaboration de leurs politiques publiques. La Nouvelle-Zélande, par exemple, a intégré des indicateurs de «bien-être» dans le budget du pays en 2019. Comme l'a dit le ministre néozélandais des Finances, Grant Robertson : «La réussite consiste à faire de la Nouvelle-Zélande à la fois un endroit où l'on gagne bien sa vie et un endroit où l'on fait bon vivre.»

UN INDICATEUR CRÉÉ PAR NECESSITÉ

La nécessité est la mère de l'invention. Tout comme le tableau de bord est né d'une nécessité absolue – l'inadéquation du PIB comme indicateur de bien-être, comme l'a révélé la crise de 2008 –, le PIB l'a été aussi. Durant la Grande Dépression, dans les années 1930, les autorités américaines pouvaient à peine quantifier le problème. Le gouvernement ne recueillait pas de statistiques sur l'inflation ou le chômage, qui auraient pu l'aider à orienter l'économie. Le ministère du Commerce a donc chargé l'économiste Simon Kuznets, du Bureau national de la recherche économique, de créer un ensemble de statistiques nationales sur le revenu. Kuznets a ensuite construit le PIB dans les années 1940, un indicateur simple que l'on pouvait calculer à partir du très petit nombre de données du marché à l'époque disponibles.

Il s'agissait du montant total, en dollars, des biens et services produits dans le pays, qui équivalait à la somme des revenus de chacun – salaires, bénéfices, loyers et impôts. Pour ces travaux et d'autres, il a reçu en 1971 le «prix Nobel» de sciences économiques (plus précisément le prix en mémoire d'Alfred Nobel décerné par la Banque de Suède). L'économiste Richard Stone, qui a créé des statistiques similaires pour le Royaume-Uni, s'est vu récompensé par le même prix en 1984.

Kuznets a toutefois averti à plusieurs reprises que le PIB ne mesurait que l'activité du marché et ne devait pas être confondu avec une mesure du bien-être social ou même économique. Le chiffre inclut de nombreux biens et services qui sont préjudiciables (parmi lesquels, selon lui, les armements) ou inutiles (tels que la spéculation financière) et exclut de nombreux biens et services essentiels qui sont gratuits (tels que les soins mutuels que se dispensent les membres d'un même foyer). L'une des principales difficultés de la construction d'un tel «agrégat» est qu'il n'existe pas

d'unité naturelle pour additionner les valeurs des pommes et des oranges, sans parler d'entités aussi disparates que les armements, la spéculation financière et les soins de santé. Par conséquent, les économistes utilisent leurs prix de marché comme une approximation de leurs valeurs, en supposant que, dans un marché concurrentiel, les prix reflètent la valeur que les gens accordent aux pommes, aux oranges, aux armements, à la spéculation ou aux soins mutuels.

Grâce à cette hypothèse profondément problématique, selon laquelle le prix mesure la valeur relative, le PIB était assez facile à calculer. Alors que les États-Unis se remettaient de la dépression en augmentant la production et la consommation de biens matériels (en particulier d'armements pendant la Seconde Guerre mondiale), le PIB a connu une croissance rapide. La Banque mondiale et le FMI ont commencé à financer des programmes de développement dans les anciennes colonies du monde entier, évaluant leur succès presque exclusivement en termes de croissance du PIB.

Au fil du temps, les économistes se sont concentrés sur les subtilités de la comparaison du PIB dans le temps et dans différents pays, et sur la construction de modèles économiques complexes qui prédisaient et expliquaient les variations du PIB. Cela leur a fait perdre de vue les fondements fragiles de cet indicateur. Dans les écoles et universités, on étudiait rarement les hypothèses ayant servi à le construire et ce que ces hypothèses signifiaient pour la fiabilité des conclusions qui en découlaient. Au lieu de cela, l'objectif de l'analyse économique est devenu d'expliquer les variations de cette entité artificielle. Le PIB est devenu hégémonique dans le monde entier: on considérait comme une bonne politique économique celle qui faisait augmenter le plus le PIB.

En 1980, après une période de performances économiques apparemment médiocres – une stagflation, marquée par une croissance du PIB lente et une hausse des prix –, le président des États-Unis Ronald Reagan a pris ses fonctions en promettant d'accélérer l'économie. Il a déréglementé le secteur financier et réduit les impôts pour les plus riches, en faisant valoir que cela bénéficierait aussi, en cascade, aux moins fortunés. Bien que le PIB ait augmenté quelque peu (mais à un rythme nettement inférieur à celui des décennies qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale), les inégalités se sont rapidement accrues. Parfaitement conscients que les indicateurs chiffrés ont déformé l'importance, certains membres de l'administration auraient préconisé l'arrêt de la collecte de statistiques sur les inégalités de revenus, si les citoyens américains étaient dans l'ignorance du niveau élevé de ces inégalités, il n'y aurait probablement pas eu matière à s'inquiéter...

L'administration Reagan a également entrepris des actions sans précédent contre l'environnement, en délivrant des baux pour l'extraction de combustibles fossiles sur des millions d'hectares de terres publiques, par exemple. En 1995, j'ai rejoint l'équipe des Conseillers économiques du président Bill Clinton. Craignant que nos indicateurs ne tiennent pas suffisamment compte de l'épuisement des ressources naturelles et de la dégradation de l'environnement, nous avons travaillé avec le ministère du Commerce pour mettre au point une mesure d'un PIB «vert», qui prendrait en compte ces pertes. Mais lorsque les représentants au Congrès des États charbonniers ont eu vent de cela, ils ont menacé de nous couper les vivres si nous n'arrêtons pas nos travaux, ce que nous avons été contraints de faire.

Ces politiciens savaient que si les citoyens des États-Unis comprenaient à quel point le charbon était néfaste à l'économie de leur pays, *mesurée correctement*, alors ils chercheraient à

On considérait comme une bonne politique économique celle qui faisait augmenter le plus le PIB

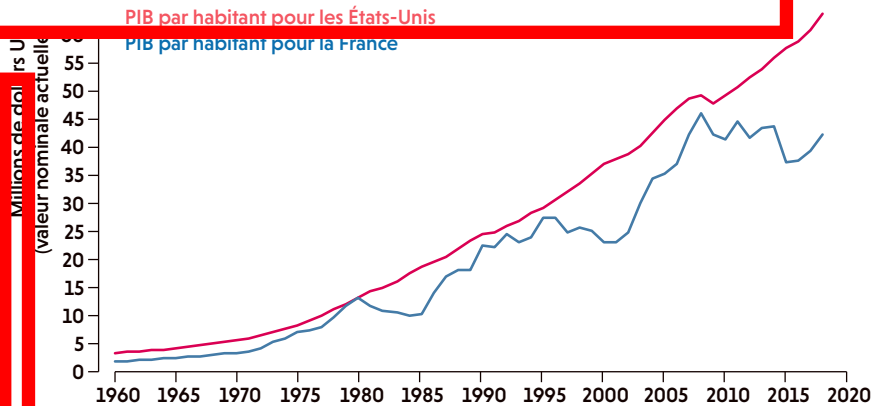
éliminer les subventions cachées que reçoit

chercher à passer plus rapidement aux énergies renouvelables. Bien que nos efforts pour élargir nos indicateurs aient été contrariés, le fait que ces représentants étaient prêts à exercer autant de pressions politiques pour mettre fin à nos travaux m'a convaincu que nous étions sur la bonne voie. (Et cela signifiait également que lorsque, dix ans plus tard, Nicolas Sarkozy m'a approché pour me proposer de diriger une commission internationale chargée d'examiner de meilleures façons de mesurer «les performances économiques et le progrès social», j'ai sauté sur l'occasion.)

J'ai quitté l'équipe des Conseillers économiques du président en 1997 et, dans les années qui ont suivi, la ferveur déréglementaire de l'ère Reagan s'est emparée de l'administration Clinton. Le secteur financier de l'économie >

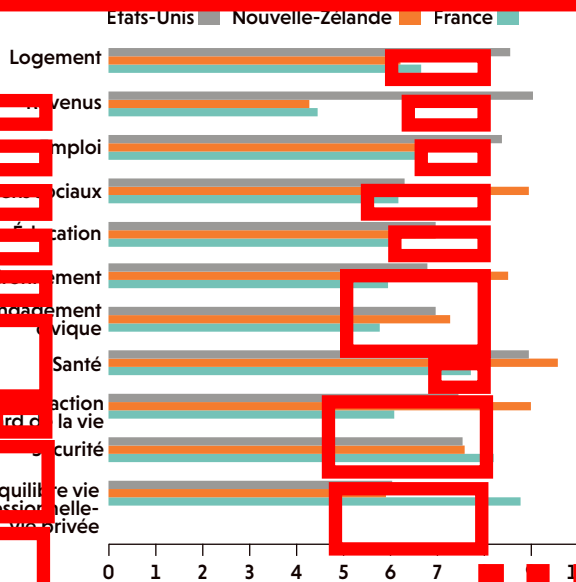
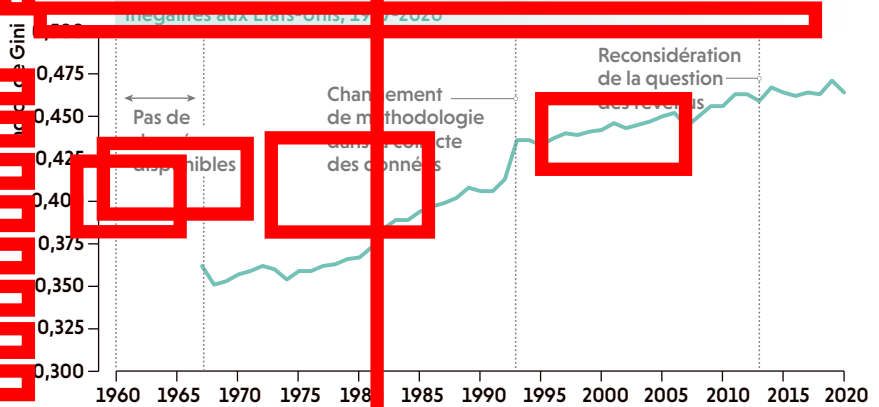
LA (MAL) MESURE DU BIEN-ÊTRE

Le produit intérieur brut, ou PIB, mesure la quantité totale de biens et de services produits dans une économie au cours d'une certaine période, généralement un an. Bien qu'on l'utilise couramment comme indicateur des performances d'une économie et d'une société, il ne s'agit que d'une mesure de l'activité marchande, et ce n'est pas la plus pertinente. Depuis la crise financière de 2008, un mouvement mondial a vu le jour pour aider chaque pays vers un avenir plus sain et plus durable.



PARTAGE ÉQUITABLE

Le PIB par habitant est obtenu en divisant le PIB par la population d'un pays. Il peut augmenter même si la qualité de vie de la plupart des habitants se détériore. Un élément clé de la divergence entre le PIB et le bien-être social est l'inégalité. Aux États-Unis, par exemple, le PIB a augmenté régulièrement depuis les années 1960, mais les inégalités (mesurées par l'« indice de Gini ») aussi. Les trois personnes les plus riches des États-Unis possèdent déjà plus de richesses que toute la moitié inférieure de la population, et la pandémie aggrave la situation.



BIEN-ÊTRE

Plusieurs indicateurs sont inclus dans les tableaux de bord du rapport « Comment va la vie ? » de l'OCDE. Certains de ces indicateurs sont également inclus dans l'Indicateur du vivre mieux, un outil interactif qui permet aux utilisateurs de comparer les pays en fonction de l'importance qu'ils accordent aux différentes dimensions du bien-être, telles que le logement, le revenu, la santé, etc. Dans cet outil, la valeur attribuée à chacune de ces onze dimensions est exprimée comme la moyenne de sous-indicateurs, normalisés sur une échelle de zéro à dix. Ce graphique compare les performances de trois membres de l'OCDE (États-Unis, Nouvelle-Zélande et France) dans les onze dimensions. Bien que le revenu par habitant soit beaucoup plus élevé aux États-Unis, la Nouvelle-Zélande obtient de meilleurs résultats en ce qui concerne la qualité de l'environnement et de la santé, la satisfaction à l'égard de la vie, le sens de la communauté et l'engagement civique. Pour la France, dont le revenu par habitant vaut environ 70 % de celui des États-Unis, sept des onze dimensions ci-dessus sont inférieures à celles des deux autres pays.

> américaine était en pleine expansion, d'où une forte hausse du PIB. Il s'est révélé qu'une

grande partie des profits qui ont donné à ce secteur un tel poids étaient, en un sens, fictifs. Les pratiques de prêt des banquiers avaient engendré une bulle immobilière qui avait artificiellement augmenté les profits des institutions financières, donc les primes touchées par les banquiers. Dans une économie de marché idéale, une augmentation des profits est censée refléter une augmentation du bien-être de l'ensemble de la société, mais les revenus des banquiers contredisaient cette idée. Une grande partie de leurs profits provenaient de la détérioration de la situation des autres, comme lorsqu'ils se livraient à des pratiques abusives en matière de cartes de crédit ou lorsqu'ils manipulaient les taux d'intérêt des prêts interbancaires pour accroître leurs revenus.

UN SECTEUR FINANCIER

DISPROPORTIONNEL

Mais s'appuyer sur le PIB revenait à prendre au pied de la lettre ces chiffres gonflés, ce qui a convaincu les décideurs politiques que la meilleure façon de faire croître l'économie était de supprimer tout le reste des réglementations limitant le secteur financier. Les vieilles interdictions d'imposer des taux d'intérêt exorbitants pour profiter des personnes non averties ont été levées. En 2000, la loi *Commodity futures modernization act*, conçue pour garantir que les produits dérivés (des produits financiers risqués qui ont joué un rôle important dans la crise financière huit ans plus tard) ne seraient jamais réglementés, a été adoptée. En 2005, une loi sur les faillites a rendu plus difficile l'acquittement des dettes de ceux qui avaient du mal à payer leurs factures, et cela l'a rendu presque impossible pour ceux qui avaient contracté des prêts pour financer leurs études universitaires.

Au début des années 2000, quelque 40 % des bénéfices des entreprises provenaient du secteur financier. Cette proportion aurait dû signaler que quelque chose n'allait pas : un secteur financier efficace doit avoir de faibles coûts pour effectuer des transactions financières et doit donc être de petite taille. Le secteur financier aux États-Unis était, en revanche, énorme. La déréglementation du marché avait gonflé les bénéfices des banques, fait augmenter le PIB, mais, en fin de compte, provoqué aussi l'instabilité.

La bulle a éclaté en 2008. Les banques avaient émis des prêts hypothécaires sans discernement, en partant du principe que les prix de l'immobilier continueraient à augmenter. Lorsque la bulle immobilière a éclaté, l'économie a fait de même, chutant plus qu'elle ne l'avait jamais fait depuis l'après-guerre. Après le sauvetage des banques par le gouvernement américain (une seule entreprise, AIG, a reçu un

renflouement gouvernemental de 130 milliards de dollars), le PIB s'est amélioré, ce qui a persuadé le président Barack Obama et la Réserve fédérale d'annoncer que nous étions sur la voie de la reprise. Mais comme 91 % des gains de revenu de 2009 à 2012 ont bénéficié au 1 % supérieur de la population, la majorité des Américains n'ont pas du tout profité de la reprise.

OPIOÏDES. OBÉSITÉ.

OURAGANS

Alors que les États-Unis sortaient lentement de la crise financière, d'autres crises ont retenu l'attention : les inégalités, le climat et les opiacés. Même si le PIB continuait d'augmenter, l'espérance de vie et d'autres indicateurs de la santé se sont détériorés. Les entreprises du secteur alimentaire ont développé et commercialisé, avec beaucoup d'ingéniosité, des aliments riches en sucre et addictifs, ce qui a augmenté le PIB mais multiplié les cas d'obésité et de diabète chez les enfants. La consommation excessive d'opioïdes, qui créent une dépendance, a provoqué un grand nombre de décès par surdose (quelque 60 000 en 2016), mais les bénéfices de Purdue Pharma et des autres acteurs malhonnêtes de ce drame ont augmenté le PIB.

En effet, les dépenses médicales résultant de ces problèmes sanitaires ont contribué à l'augmentation du PIB. En moyenne, un Américain dépense deux fois plus pour les soins de santé qu'un Français, mais il a une espérance de vie plus courte. De même, l'extraction du charbon semble stimuler l'économie bien qu'elle contribue au changement climatique. Si ce dernier aggrave l'impact d'ouragans tels que Harvey, les efforts de reconstruction contribuent aussi au PIB. Le chiffre du PIB a ainsi donné un vernis optimiste aux pires événements.

Ces exemples illustrent la déconnexion qui existe entre le PIB et le bien-être de la société et les nombreuses façons dont le PIB échoue à constituer une bonne mesure de la performance économique. La croissance du PIB avant 2008 n'était pas durable, et elle ne l'est pas duré. L'augmentation des bénéfices des banques qui semblait alimenter le PIB dans les années précédant la crise ne s'est pas faite uniquement au détriment du bien-être des nombreuses personnes victimes des pratiques du secteur financier, mais aussi au détriment du PIB dans les années suivantes. L'augmentation des inégalités a été, à tous égards, préjudiciable à notre société, mais le PIB célébrait les succès des banques. S'il est un événement qui a fait prendre conscience de la nécessité de trouver de nouveaux moyens de mesurer les performances économiques et les progrès de la société, c'est bien la crise de 2008.

La commission évoquée plus haut, dirigée par trois économistes (Amartya Sen, de l'université Harvard, Jean-Paul Fitoussi, de >

> Sciences Po, à Paris, et moi-même), a publié son premier rapport en 2009, juste après l'implosion du système financier des États-Unis. Nous avons souligné que mesurer une chose aussi simple que la proportion d'Américains qui pourraient avoir des difficultés à refinancer leurs prêts hypothécaires aurait permis de dissiper la fumée et les faux-semblants autour de la croissance économique effrénée qui avait précédé la crise, ce qui aurait peut-être permis aux décideurs politiques de contrer cette dernière. Plus important encore, la mise en place d'un éventail de mesures du bien-être actuel et de sa durabilité ainsi que l'attention portée à ces mesures permettraient de protéger les sociétés contre les chocs futurs.

Nous devons savoir si lorsque le PIB augmente l'endettement s'accroît ou les ressources naturelles s'épuisent; ces éléments peuvent indiquer que la croissance économique n'est pas durable. Si la pollution augmente en même temps que le PIB, la croissance n'est pas durable sur le plan environnemental. Un bon indicateur de la véritable santé d'une économie est la santé de ses citoyens, et si, comme aux États-Unis, l'espérance de vie diminue – ce qui était le cas avant même la pandémie actuelle – cela devrait être inquiétant, quelle que soit la croissance du PIB. Si le revenu médian stagne alors même que le PIB augmente, cela signifie que les fruits de la croissance économique ne sont pas partagés.

UN TABLEAU DE BORD

Bien sûr, il aurait été intéressant de proposer un indicateur chiffré unique, une sorte de PIB amélioré, qui résumerait les performances d'une société ou même d'une économie. Mais comme pour le PIB lui-même, on perd trop d'informations précieuses en construisant un tel agrégat.

Supposons par exemple que vous soyez au volant de votre voiture. Vous voulez savoir à quelle vitesse vous roulez et vous regardez le compteur de vitesse. Il affiche 110 kilomètres par heure. Et vous voulez savoir jusqu'où vous pouvez aller sans refaire le plein de carburant, distance qui se révèle être de 350 kilomètres. Ces deux nombres sont précieux, car ils fournissent des informations qui orientent votre comportement. Mais supposons maintenant que vous formiez un simple agrégat en additionnant les deux nombres, avec ou sans facteurs de pondération. Que vous indiquent un nombre comme 460? Absolument rien. Il ne vous indiquera pas si vous conduisez de manière imprudente ou si vous devez vous inquiéter de tomber en panne sèche.

C'est pourquoi nous avons conclu que chaque pays a besoin d'un tableau de bord, c'est-à-dire un ensemble de chiffres qui diagnostiqueraient les éléments essentiels de la



Avec un indicateur chiffré unique, on perd trop d'informations précieuses

société et de l'économie et aideraient à orienter les politiques publiques.

de la société civile devraient prêter attention non seulement à la richesse matérielle, mais aussi à la santé, à l'éducation, aux loisirs, à l'environnement, à l'égalité, à la gouvernance, à la participation à la vie politique, aux liens sociaux, à la sécurité physique et économique et à d'autres indicateurs de la qualité de vie.

Tout aussi important, les sociétés doivent veiller à ce qu'elles n'achètent pas ces « biens » au détriment de l'avenir. À cette fin, elles doivent s'efforcer de maintenir et d'accroître, dans la mesure du possible, leurs stocks de capital naturel, humain, social et physique. Nous avons également établi un programme de recherche pour explorer les liens entre les différentes composantes du bien-être et de la durabilité et développer de bonnes méthodes pour les mesurer.

Les préoccupations relatives au changement climatique et à l'augmentation des inégalités avaient déjà alimenté une demande mondiale pour de meilleurs indicateurs, et

notre rapport a cristallisé cette tendance. En 2015, un processus politique compliqué a abouti à l'établissement par les Nations unies de 17 objectifs de développement durable. Les progrès accomplis dans leur réalisation sont à mesurer par 232 indicateurs, qui reflètent les multiples préoccupations de gouvernements et sociétés civiles du monde entier. Mais tant que les chiffres ne sont pas utiles, à notre avis : à force de regarder les arbres, on peut perdre de vue la forêt. Au lieu de cela, un autre groupe d'experts, présidé par Jean-Paul Fitoussi, Martine Durand (jusque récemment statisticienne en chef de l'OCDE) et moi-même, a recommandé que chaque pays instaure un dialogue démocratique solide pour mettre au jour les aspects qui préoccupent le plus ses citoyens.

Un tel dialogue montrerait presque certainement que pour la plupart d'entre nous, qui vivons dans des économies très développées, les principaux soucis sont notre bien-être matériel, notre santé, l'environnement qui nous entoure et nos relations avec les autres. Nous voulons bien faire aujourd'hui, mais aussi à l'avenir. Nous nous soucions de la manière dont les fruits de notre économie sont partagés : nous ne voulons pas d'une société où quelques personnes au sommet possèdent tout tandis que les autres vivent dans la pauvreté.

Le choix des indicateurs peut varier dans le temps et d'un pays à l'autre. Les pays où le chômage est élevé voudront suivre l'évolution de cette variable ; ceux où les inégalités sont fortes voudront examiner leur devenir. Néanmoins, comme les gens veulent généralement savoir comment ils se situent par rapport aux autres, nous avons recommandé que les pays développés, au moins, partagent cinq à dix indicateurs communs.

Le PIB serait l'un d'entre eux. Il en irait de même pour une mesure des inégalités, un indicateur de la situation d'un individu ou d'un foyer typique. Au fil des ans, les économistes ont formulé une série d'indicateurs d'inégalité, chacun reflétant une dimension différente du phénomène. Il se pourrait bien que les sociétés où l'inégalité est devenue particulièrement problématique aient besoin de chiffres reflétant la profondeur de la pauvreté en bas de l'échelle et les excès de richesse en haut. Pour moi, il est particulièrement important de savoir ce qu'il advient du revenu médian, le revenu de la personne qui est exactement au milieu de la distribution ; aux États-Unis, le revenu médian a à peine changé depuis des décennies, alors que le PIB a augmenté.

L'emploi est souvent utilisé comme un indicateur de la performance macroéconomique : une économie où le taux de chômage est élevé n'utilise manifestement pas bien toutes ses ressources. Mais dans les sociétés où le travail rémunéré est associé à la dignité, l'emploi est

une valeur à part entière. Parmi les autres éléments du tableau de bord figureraient des indicateurs de dégradation de l'environnement (par exemple, la qualité de l'air ou de l'eau), de durabilité économique (endettement), de santé (espérance de vie) et d'insécurité.

L'insécurité a des dimensions à la fois subjectives et objectives. Il est possible de conduire des enquêtes sur le sentiment d'insécurité des personnes, c'est-à-dire à quel point elles s'inquiètent face aux risques d'événements néfastes ou à quel point elles se sentent prêtes à faire face à un choc. Mais on peut aussi considérer la probabilité qu'une personne tombe sous le seuil de pauvreté au cours d'une année donnée.

Et certains éléments du tableau de bord pourraient être des variables « intermédiaires », c'est-à-dire des aspects que nous pouvons ne pas valoriser en soi mais qui donnent une idée de la manière dont une société fonctionnera à l'avenir. L'une de ces variables est la confiance. Les sociétés où les citoyens font confiance à leur gouvernement et à autrui pour « faire ce qu'il faut » ont tendance à être plus performantes. En fait, les pays où les habitants ont un niveau de confiance plus élevé, comme le Vietnam et la Nouvelle-Zélande, ont fait face à la pandémie de Covid-19 bien plus efficacement que, par exemple, les États-Unis, où le niveau de confiance a diminué depuis l'ère Reagan.

DES OUTILS QUI SERAIENT UN MEILLEUR GUIDE

Depuis que nous avons élargi nos travaux sur les indicateurs de bien-être, il y a une douzaine d'années, j'ai été étonné de la résonance qu'ils ont eue. L'attention portée à de nombreux éléments du tableau de bord a imprégné l'élaboration des politiques partout dans le monde. Tous les trois ans, l'OCDE organise une conférence internationale réunissant des organisations non gouvernementales, des statisticiens nationaux, des responsables gouvernementaux et des universitaires pour faire avancer le programme de « bien-être », la dernière en date étant le forum tenu en Corée du Sud en novembre 2018, qui a réuni des milliers de participants.

Lors de la prochaine conférence, la crise mondiale qu'un virus a précipitée sera certainement à l'ordre du jour. Il faudra peut-être des années, voire des décennies, pour en saisir toute l'ampleur. Pour se remettre de cette calamité et guider les sociétés complexes à travers les crises encore plus dévastatrices qui se profilent à l'horizon – un changement climatique catastrophique et l'effondrement de la biodiversité –, il faudra, à tout le moins, un excellent système de navigation. Pour paraphraser l'OCDE : nous avons mis au point les outils qui nous aideraient à mieux conduire. Il est temps de les utiliser. ■

BIBLIOGRAPHIE

OCDE, *Comment la vie peut-elle mesurer le bien-être*, OCDE 2020 (<https://doi.org/10.1787/ab72c502-fr>).

J. E. Stiglitz, J.-P. Fitoussi et M. Durand, *Measuring What Counts: The Global Movement for Well-Being*, New Press, 2019.

J. E. Stiglitz, *People, Power, and Profit: Progressive Capitalism for an Age of Discontent*, W. W. Norton, 2019.

J. E. Stiglitz, A. Sen et C. P. Fitoussi, *Mismeasuring Our Lives: Why GDP Doesn't Add Up*, New Press, 2010.

La médecine entre épidémies et politique... sous la Révolution

En 1789, les médecins se sont retrouvés au cœur de jeux de pouvoir visant à préserver la santé des populations sans pour autant enlever ni les nouvelles libertés... ni l'économie de guerre.

Marseille, 25 mai 1720. Le *Grand Saint-Antoine*, navire d'un négociant de la ville, accoste en provenance de Smyrne, en Asie mineure, du Liban et de la Syrie, où il s'est approvisionné en coton et autres marchandises. Moins d'un mois plus tard, après plusieurs décès à bord et malgré une quarantaine, les premiers cas de peste apparaissent en ville. Les autorités locales prennent les premières mesures coercitives : séquestration à domicile des malades et de leurs proches, >

Le port de Marseille pendant l'épidémie de peste de 1720 (gravure d'après une peinture de Michel Serre). En dépit de la mise en quarantaine de la ville, la peste y a fait 50 000 morts et 75 000 en Provence.



L'ESSENTIEL

> A partir de 1789, les médecins, garants de

l'hygiène publique, ont gagné d'importants pouvoirs sur tout ce qui concernait, de près ou de loin, la santé des populations.

> S'appuyant sur leurs amis, les autorités révolutionnaires ont essayé de maintenir un équilibre entre les nouvelles libertés obtenues et les contraintes sanitaires.

> Les mesures prises, cependant, sont restées

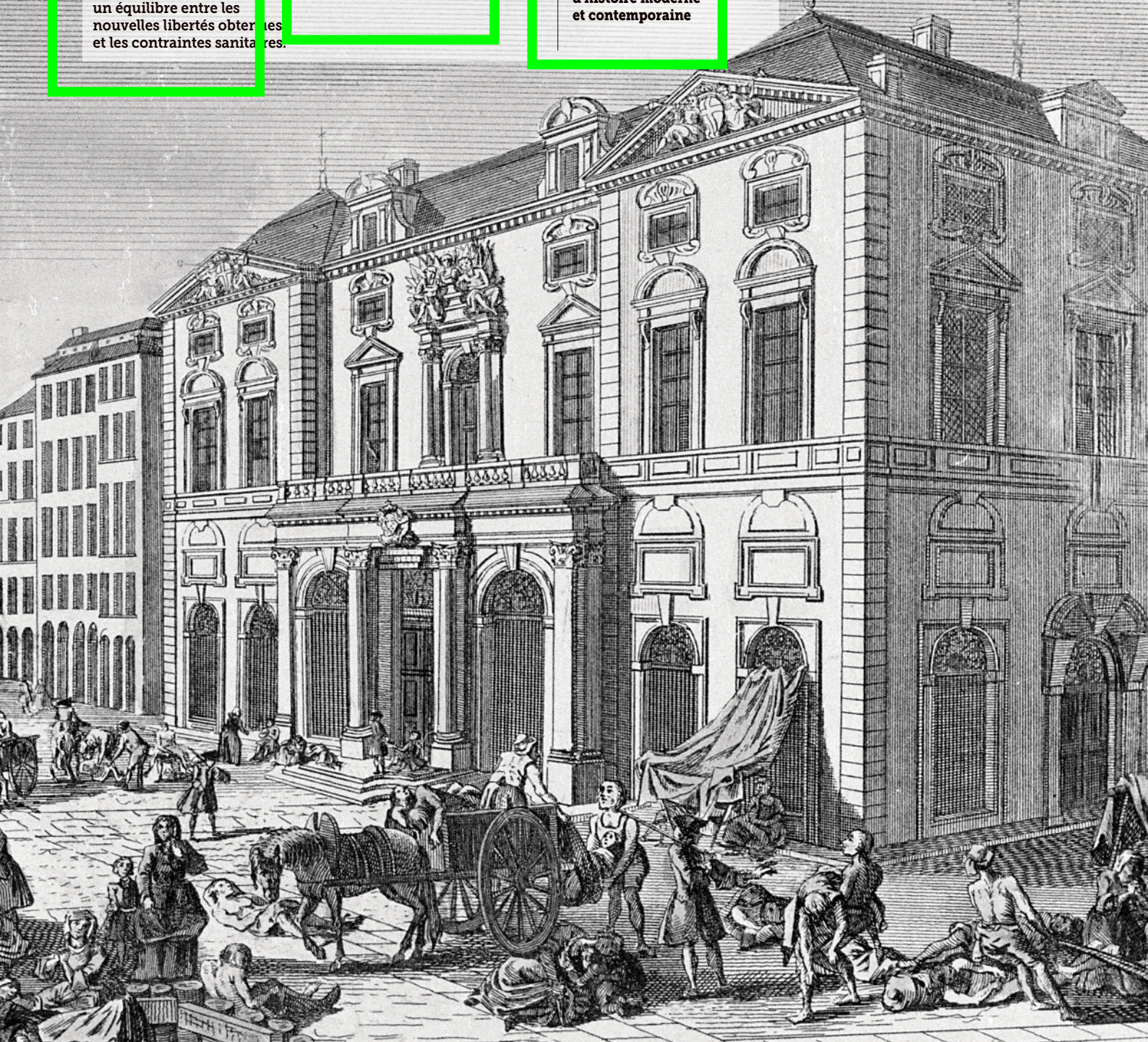
des coercitives et arbitraires de la guerre, qui a transformé Paris en un arsenal chirurgical et militaire au détriment de la santé de ses habitants.

> Bonaparte lui-même a assis son pouvoir en se jouant des contraintes sanitaires.

L'AUTEUR



JEAN-LUC CHAPPEY
professeur d'histoire
des sciences à l'université
Paris 1 Panthéon-Sorbonne,
au sein de l'Institut
d'histoire moderne
et contemporaine



> expulsion des mendiants étrangers hors de la cité, enfermement des indigents. Le Parlement de Provence, quant à lui, interdit tout commerce avec la ville et ordonne de fermer ses portes. Début août, la municipalité ordonne d'embraser les remparts, les rues et les places pour assainir l'air. L'épidémie atteint son paroxysme en septembre. Chaque jour, plus de mille personnes décèdent. Les autorités requièrent vagabonds et forçats pour enlever les corps et les débris qui s'amoncellent dans les rues. Le pouvoir central envoie des médecins en renfort et isole Marseille et la Provence du reste du royaume. L'épidémie faiblit peu à peu, mais la cité reste confinée jusqu'en novembre 1721. À la suite d'une rechute épidémique, le port subit encore un blocus commercial de plusieurs mois en 1722.

La lutte contre les épidémies justifie-t-elle la réduction des libertés individuelles et collectives? La question s'est posée avec acuité quelques années plus tard, en 1789, et dans des termes qui ne sont pas éloignés de ceux employés aujourd'hui: au moment où étaient proclamés les principes de la nouvelle communauté nationale dans la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen, était-il possible de justifier des mesures coercitives, limitant les libertés individuelles, au nom de la défense de la santé commune? Si, après l'épidémie de Marseille, la propagation de la peste a été limitée, c'est parce que la monarchie absolue s'est appuyée sur des outils particulièrement contraignants (recours à l'armée, quarantaine, confinement et surveillance des populations...). Le pouvoir royal bénéficiait alors du soutien des médecins qui, s'ils n'étaient pas tous d'accord sur les origines des maladies et sur les moyens de les guérir, considéraient tous comme légitime la nécessité d'une intervention de l'État dans ces affaires sanitaires.

Selon le philosophe Michel Foucault, c'est dans cette politique sanitaire définie sous la notion d'hygiène publique qu'il convient de rechercher les racines de la «biopolitique», qui cristallise, aujourd'hui encore, les débats et controverses. Alors qu'ils s'érigeaient en «instituteurs» du genre humain, les députés de l'Assemblée nationale constituante ont dû trouver les moyens de faire entrer la politique sanitaire dans la nouvelle ère des libertés. Pendant la période révolutionnaire, tout comme cela se produit encore aujourd'hui avec le Covid-19, les peurs causées par les épidémies et les mesures pour y faire face ont eu des effets essentiels sur les décisions politiques et, plus largement, sur les manières de gouverner les sociétés. S'appuyant sur les avis, souvent divergents, des médecins (les «hygiénistes») et autres experts, les différentes autorités politiques qui se sont succédé entre 1789 et 1800 ont dû assurer un équilibre, toujours fragile,



Jean-Luc Chappey a récemment publié *La Révolution des sciences 1789 ou le sacre des sages*, Vuibert, 2020.

entre la défense des nouveaux droits individuels et collectifs et les exigences liées aux contraintes sanitaires.

SUR LE TERREAU FERTILE DES GRANDES PEURS ÉPIDÉMIQUES

Dès 1789, les risques d'épidémie et de contagion sont au cœur des dynamiques de crise et de radicalisation politique. Si le pouvoir absolutiste est parvenu à éliminer les grandes épidémies de peste qui ont marqué l'Europe du XVIII^e siècle, les risques de contagion restent très présents, comme en témoigne l'épidémie de dysenterie qui touche quasiment toutes les provinces françaises en 1779. Aussi les conditions sanitaires et l'amélioration de l'encadrement médical reviennent-elles souvent dans les cahiers de doléances que les populations rurales et urbaines rédigent au printemps 1789.

Par ailleurs, les soulèvements paysans (connus sous le nom de «Grande Peur») qui agitent les campagnes françaises au cours de l'été 1789 soulignent les liens entre les rumeurs liées au nouveau contexte (la peur des «bandits» soudoyés par les contre-révolutionnaires) et des peurs plus anciennes: dans de nombreuses provinces, ces soulèvements tirent leurs origines des soupçons liés à la présence – plus ou moins réelle et fantasmée – d'étrangers accusés d'empoisonner des puits d'eau ou d'ensorceler les troupeaux. Ces rumeurs sont d'autant plus prégnantes qu'elles sont instrumentalisées et détournées par des porte-parole politiques qui s'en emparent pour stigmatiser leurs adversaires.

Sur les bancs de la nouvelle Assemblée nationale ou des clubs, les notions de contagion et d'épidémie s'imposent dans la rhétorique révolutionnaire: pour les révolutionnaires, il s'agit de dénoncer tous les excès, abus et injustices accusés d'être à l'origine des maladies physiques et morales des Français; pour leurs opposants, la Révolution est tout entière considérée comme une maladie distillée par le biais des journaux et des clubs.

Au fil des années, ces métaphores produisent des effets: dès 1792, l'Espagne met en place un cordon sanitaire sur les Pyrénées afin d'empêcher la contagion des idées révolutionnaires.

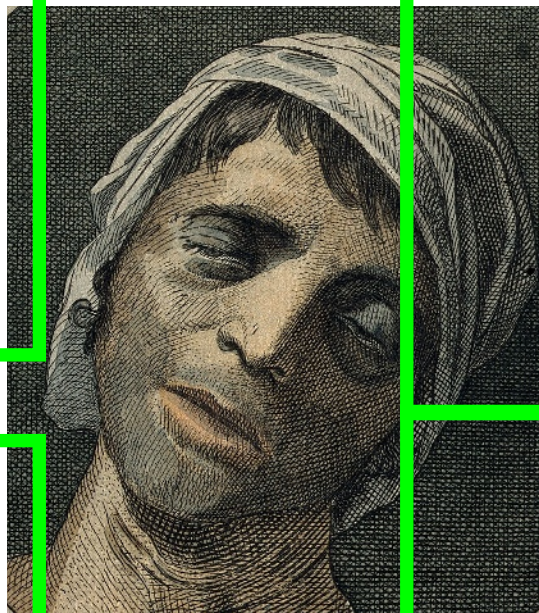
La lutte contre les épidémies justifie-t-elle la réduction des libertés?

venues de France par la circulation des livres; en 1793, le corps malade de Jean-Paul Marat devient, aux yeux de ses ennemis, le signe évident d'une infamie politique. Quelques mois plus tard, Robespierre est lui-même affublé de diverses maladies qui expliqueraient son goût pour la violence... Autant de matériaux qui, aujourd'hui encore, alimentent la légende noire dont il est l'objet. Quelques jours avant sa chute politique (le 9 thermidor an II, soit le 27 juillet 1794), un commissaire du département de Paris informe la Convention nationale de nombreuses rumeurs sur une menace de peste qui planerait sur la capitale, signe encore de l'articulation étroite entre les phases de crise politique et la présence, avérée ou non, d'épidémies.

UNE POLITIQUE SANITAIRE RENFORCÉE

Au-delà des discours, les autorités révolutionnaires, qui se situent dans l'héritage de la monarchie absolutiste, se montrent particulièrement soucieuses de la santé des populations: royaume le plus peuplé d'Europe, la France tire sa puissance politique, économique et culturelle de sa vitalité démographique qui s'appuie, depuis le début du XVIII^e siècle, sur la baisse des mortalités liées aux «pestes» et aux épidémies. Après 1789, les autorités maintiennent, voire renforcent, les différents dispositifs qui constituent la «police sanitaire» de l'Ancien Régime: surveillance et mise en quarantaine des vaisseaux venant des zones à risque en Méditerranée; surveillance administrative de la circulation des maladies; lutte contre les «miasmes» et la mauvaise qualité de l'air par l'assèchement des étangs et le déplacement des cimetières; dans les grandes villes, éloignement de toutes les activités polluantes des zones les plus peuplées, comme les boucheries, les mégisseries ou les tanneries.

Entre 1789 et 1790, les nouvelles municipalités maintiennent ces contraintes, préservant ainsi la santé des citoyens qui composent la nouvelle nation «régénérée». Les membres de la Société royale de médecine, institution créée en 1776 en grande partie pour lutter contre les épidémies, poursuivent leurs travaux, en particulier leurs enquêtes menées dans les différentes provinces afin de dresser une cartographie sanitaire et épidémiologique de la nation. Selon son secrétaire général, Félix Vicq d'Azyr, il convient de relier les origines, souvent complexes, des épidémies aux milieux naturels et sociaux dans lesquels vivent les populations, comme il l'énonce en 1786 lors d'une séance:



Jean-Paul Marat (ici par J. L. Copie d'après un dessin de Jacques-Louis David, 1793), souffrant d'une maladie de peau dans laquelle ses détracteurs voyaient une infamie politique.

La topographie exacte des lieux, les observations météorologiques, la description des maladies, dans l'ordre où elles ont paru, ainsi que l'exposé de leurs symptômes, simple, dégagé de tout système, de toute explication, sont les seuls et vrais moyens de parvenir à cette connaissance désirée. Il serait utile pour notre art qu'il existât, si j'ose m'exprimer ainsi, une carte chronologique universelle et méthodique des épidémies, par le moyen de laquelle l'origine et le développement de chacune se présenteraient à l'œil du véritable médecin, la cause lui en serait connue, et la sûreté du traitement en deviendrait une conséquence aussi précieuse que réelle: peut-être même qu'instruit sur l'avenir, par la connaissance du passé, il en prévendrait les ravages; et la maladie combattue dès sa naissance, avec les armes appropriées, serait et moins étendue et moins funeste.

En novembre 1790, le même Vicq d'Azyr présente aux députés de l'Assemblée constituante (au sein de laquelle existe un Comité de santé) un vaste plan général de réorganisation de la médecine française. Aux yeux de ce dernier, comme de nombreux médecins hygiénistes que l'on retrouve au sein des diverses administrations tant nationales que locales, la période qui s'ouvre avec la Révolution doit permettre de renforcer encore l'intervention de l'État pour lutter contre les maladies et garantir la santé publique.

Aux côtés des préconisations visant à améliorer le fonctionnement institutionnel des hôpitaux et à réformer en profondeur un système d'enseignement jugé totalement inadapté, Vicq d'Azyr insiste sur la place centrale que doivent occuper les médecins, chirurgiens, sages-femmes et vétérinaires dans la mise en œuvre d'une véritable politique sanitaire. Ces derniers sont en effet appelés à jouer un rôle politique et social fondamental puisqu'ils doivent garantir la santé de la nation: il ne s'agit pas seulement de soigner les populations, mais aussi de prévenir tous les risques susceptibles de provoquer les maladies et d'en favoriser la circulation.

En septembre 1791, les constituants adoptent un décret qui reprend les propositions de Vicq d'Azyr. Au nom de la lutte contre les maladies épidémiques, endémiques et épi-zootiques, ce décret donne aux médecins d'importants pouvoirs. Garants de la salubrité et de l'hygiène publique, ils interviennent sur des terrains aussi divers que l'aménagement urbain, le contrôle des activités industrielles (particulièrement chimiques) et artisanales, le contrôle des manufactures ou la surveillance des circuits alimentaires, des prisons, des >

> hôpitaux et, plus généralement, de tout ce qui touche de près ou de loin à la santé des populations: les cimetières, les mines, les égouts, les boucheries, les abattoirs, les métiers utilisant des animaux, des minéraux ou des substances considérées comme toxiques.

Dans la France révolutionnaire, le médecin devient ainsi un rouage central de l'encadrement administratif. Dans les faits, de nombreuses résistances se font jour contre cette emprise médicale: aux contraintes médicales s'opposent en effet d'autres logiques, en particulier celle des partisans des «libertés» de commercer et d'entreprendre, qui, s'appuyant sur la loi d'Allarde (également votée en 1791 et autorisant quiconque à exercer la profession qu'il souhaite tant qu'il s'est pourvu d'une patente), refusent de soumettre leurs activités à une politique sanitaire jugée coercitive.

SANTÉ VERSUS ÉCONOMIE DE GUERRE

L'entrée en guerre de la France contre l'Autriche en avril 1792, puis son extension au printemps 1793, bouleversent les fondements de la politique sanitaire. Néanmoins, la préservation de la santé des populations, comme des animaux, reste un impératif pour les autorités révolutionnaires. Alors qu'il devient nécessaire de lever des hommes, de les nourrir et de les équiper, il s'agit en effet d'éviter des épidémies et les épizooties. Dans plusieurs départements, les représentants en mission, aidés de médecins et de vétérinaires, prennent des mesures pour lutter contre les épizooties: isolement ou abattage des bêtes malades, enfouissement des cadavres et des fumiers...

Les mesures pour préserver la santé des populations se heurtent cependant de plus en plus aux contraintes de l'économie de guerre, indispensables à la survie de la République. Alors que les autorités ne cessent de proclamer la nécessité de préserver la santé des populations et des animaux, le gouvernement révolutionnaire justifie, à partir de 1793, la suppression des mesures coercitives sur lesquelles reposait la police sanitaire mise en œuvre depuis 1789. Il autorise ainsi l'installation en plein centre de Paris d'activités polluantes, au risque de mettre en danger la santé des populations environnantes.

Arsenal de la République où viennent se concentrer les usines d'armes et d'équipement, Paris devient la capitale la plus polluée d'Europe. Autour de Notre-Dame, la Seine se transforme en un véritable couloir de la chimie accueillant des manufactures grandes consommatrices d'acides, de chlores ou de soudes dont la production et l'utilisation sont de moins en moins contrôlées. Arsenal militaire, Paris devient une capitale où les activités polluantes et salissantes peuvent désormais s'implanter

avec l'appui des autorités et la caution de certains savants, en particulier les chimistes.

Lorsqu'ils se déplacent pour expertiser les effets des pollutions, il n'est pas rare que les médecins en minimisent la portée et préconisent de simples mesures d'hygiène qui ne sont pas à la mesure des risques subis par les populations.

Les témoignages de voyageurs, présents à Paris, soulignent les effets toxiques de ces pollutions sur les populations: «On peut dire avec la plus grande vérité, que Paris est malade: point de bonnes mines, pâleur d'objets, en tout et partout l'apparence du malheur. Voilà du moins le premier coup d'œil, en parcourant beaucoup de rues dans le centre de la ville», écrit le comte italien Bartolomeo Benicassi dans son *Journal d'un voyageur neutre* (1796).

Dans ce climat particulièrement malsain auquel s'ajoute la peur d'une invasion étrangère, toutes les rumeurs sur de possibles épidémies constituent pour les autorités de réelles menaces. Les «ennemis» ne sont-ils pas tentés d'empoisonner les Parisiens? Durant l'été 1794, une maladie suspecte se déclenche au cœur même de l'école de Mars, créée en juin pour

L'APPORT DE LA MÉDECINE ITALIENNE

Au fil de l'avancée des troupes républicaines dans les territoires ennemis, les médecins français sont entrés

en contact avec leurs confrères italiens dont les travaux et pratiques en matière de soins, d'usage des médicaments et d'aménagements des établissements hospitaliers étaient considérés comme des modèles dans toute l'Europe. Au cours des dernières décennies du XVIII^e siècle, nombre de ces médecins réformateurs italiens (tel le médecin napolitain Antonio Savarese, qui participa ensuite à l'expédition d'Égypte et à celle de Saint-Domingue en 1802) s'étaient engagés dans les mouvements patriotiques qui remettaient en cause les régimes princiers et aristocratiques

en Italie. Certains ont donc accueilli les armées françaises avec enthousiasme. À leurs côtés, les médecins militaires français se sont familiarisés avec de nouvelles techniques chirurgicales et ont appris l'usage de nouveaux médicaments (en particulier le laudanum). Sur un plan plus théorique, le terrain italien, et notamment la remarquable gestion des zones humides, a confirmé l'importance accordée aux thèses néohippocratiques (selon lesquelles les origines des maladies et de leurs traitements doivent être recherchées dans les environnements – les miasmes – où vivent les populations). Il a aussi permis aux Français d'accéder aux travaux du médecin écossais John Brown (1735-1788), dont les recherches sur les nouveaux médicaments ont transformé en profondeur les pratiques thérapeutiques en Europe.

OBSERVATIONS.

Vienne, Autriche. . . Le 1^{er}, tremblement de terre, précédé & suivi de froid & de chaleurs extraordinaires pour la saison.
 Saxe. Le 4, à midi, tempête violente & tonnerre en Saxe.
 Bergen, Comté de Han-
 naut. Le 5, à une heure du soir, tremblement de terre.
 Portici & Réfina, Italie. . . Le 12, tremblement de terre.
 Piiloye, Italie. Le 24 & le 31, à six heures du soir, tremblement de terre.
 Alpes du District de
 Lizzanno. Le 27, neige abondante & vent impétueux.

MALADIES.

Avezac, Néhouzan. : : Rhumes, fluxions de poitrine.
 Billon, Auvergne. . . . Pendant l'automne, fièvres tierces, continues & intermittentes; dysenteries en petit nombre, cours de ventre.
 Bordeaux, Guyenne. : : Rhumes, catarrhes, maux de gorge.
 Bourbonne-les-Bains,
 Champagne. Dysenteries.
 Chinon, Touraine. . . . Dysenteries, catarrhes, coqueluche, fièvres irrégulières, fièvres eruptives, rhumatisme.
 Cuffet, Bourbonnois. . . Fièvres rémittentes, fluxions catarrhales.
 Dijon, Bourgogne. : : Fièvres catarrhales, fluxions, fièvres quartes, vertiges.

Les Essarts, Poitou. . . . Dysenterie épidémique.
 Lille, Flandres. Rhumes épidémiques, fluxions de poitrine, fièvres intermittentes.
 Lorette, Comminge. . . . Fièvres quartes, fluxions sur les dents.
 Luçon, Poitou. Dysenterie meurtrière.
 Montauban, Languedoc. . . Fièvres rémittentes, rougeoles, fluxions de poitrine.
 Mont-Morenci, Ile de
 France. Aucune maladie; quelques morts subites.
 Mont-Louis, Roussillon. . . Douleurs de côté; fièvres putrides bilieuses dans les environs.
 Obernheim, Allemagne. . . Fièvres putrides vermineuses, pleurésies.
 Paris, Ile de France. . . . Rhumes épidémiques, fièvres catarrhales, affections rhumatismales, jaunisse, érysipèles.
 Poitiers, Poitou. : : . Petite-vérole, coqueluche, fièvres continues, icôtes, hémorrhagie; maux de gorge aphteux, fièvres tierces, ténésimes, maux de tête, apoplexies.
 St-Saturnin, Provençe. . . Coqueluche.
 Soissons, Ile de France. . . Dysenterie, fièvre quarte.
 Troyes, Champagne. . . . Petite-vérole, fièvre putride vermineuse, coqueluche épidémique, fièvre tierce, fluxion de poitrine.
 Vite, Normandie. Pendant l'automne, dysenterie épidémique, fièvre lente nerveuse.

À la fin du XVIII^e siècle, la Société royale de médecine répertoriait chaque mois (et en décembre 1779) les maladies survenues dans différentes villes, ainsi que les conditions météorologiques. Ses membres pensaient en effet que les deux événements étaient liés.

accueillir 4000 jeunes volontaires et leur donner une instruction militaire et une éducation républicaine. Plusieurs journaux font écho d'odeurs fétides et de bruits alarmants, déclenchant la panique chez les populations voisines du Champ-de-Mars. Les membres de la commission médicale envoyée dans l'urgence parviennent en quelques jours à ramener le calme: il s'agit en fait d'une épidémie de dysenterie. Isolant les malades en les répartissant sous des tentes, les médecins parviennent à aliter près de 1200 malades; seuls 10 élèves succombent. Certains savants et députés n'hésitent pas à critiquer les effets des activités polluantes sur la santé des populations, insistant sur l'apparition de nouvelles maladies liées à la guerre.

Les autorités républicaines n'abandonnent pas pour autant les mesures destinées à protéger les populations des épidémies, même si elles ne concernent qu'une petite partie des populations comme l'illustre le décret voté en juin 1793 par la Convention nationale, qui rend obligatoire l'inoculation antivariolique (l'inoculation de pus prélevé sur une personne

infectée) pour tous les enfants dont les parents reçoivent un secours public. Bien que plusieurs autres motivations entrent en jeu, le gouvernement mobilise largement l'argument sanitaire pour justifier le décret du 14 frimaire an II (4 décembre 1793), qui prévoit l'assèchement des étangs et marais de l'ensemble de la République: il accuse les étangs de provoquer des brumes, des grêles tardives et même des pluies d'insectes.

La remise en place partielle de la réglementation contre les activités polluantes, cependant, ne suffit pas à calmer les partisans des «libertés». La politique sanitaire du Directoire se heurte encore à leur pression. Surtout, elle doit faire face à de nouvelles contraintes militaires. La France, devenue conquérante au lendemain de la victoire de Fleurus, en juin 1794, voit ses armées franchir ses frontières pour conquérir de nouveaux territoires en Belgique, aux Pays-Bas, en Italie et en Égypte. L'extension géographique des conflits augmente les déplacements des troupes en Europe, des mouvements qui favorisent la circulation des maladies comme la peste bovine, laquelle frappe particulièrement les départements du nord de la République sous le Directoire.

Au fil des conquêtes, les autorités militaires et civiles doivent affronter de nouvelles maladies qui touchent les soldats. Heureusement, comme le montrent plusieurs exemples sur les terrains italiens, les contacts établis entre médecins français et médecins locaux permettent de nombreuses innovations tant dans l'organisation du système hospitalier installé sur place par les Français que sur les traitements thérapeutiques. Voir >

Il n'est pas rare que les médecins minimisent la portée des effets de la pollution

> l'encadré page 68). Ces expériences menées par les médecins militaires ont encore été particulièrement importantes en Égypte, où ils ont été confrontés à de nombreuses maladies (ophtalmie, dysenterie, peste...).

BONAPARTE AU CHEVET DE PESTIFÉRÉS

Le mythe bonapartiste se construit en partie dans le contexte de crise lié à l'épidémie de peste qui débute à Alexandrie en décembre 1798 parmi la population égyptienne, mais aussi dans les rangs de l'armée française. Alors que les médecins (30 officiers sous la direction des chirurgiens Dominique Larrey et René-Nicolas Desgenettes) organisent un réseau hospitalier et mettent en place de nouveaux moyens de déplacements des malades, la visite de Bonaparte à l'hôpital des pestiférés de Jaffa en mars 1799 contribue à renforcer la popularité du jeune général auprès des soldats et des populations françaises informées par des canaux de propagande efficaces.

Par ce geste héroïque (toucher des malades), Bonaparte ne cherche-t-il pas à s'approprier une partie du pouvoir thaumaturgique des rois français ? Il n'en reste pas moins qu'un an plus tard il n'hésite pas à rentrer en France de manière illégale en s'affranchissant des règles pourtant strictes de réglementation sanitaire obligeant tous les équipages des navires venant du Levant ou d'Afrique du Nord à respecter une quarantaine destinée à déceler la présence éventuelle de peste.

Après avoir quitté Alexandrie le 23 août 1799, Bonaparte et l'équipage de la frégate *Murion* et *Corèze* débarquent, en dépit des règlements, à Ajaccio le 3 octobre, les autorités locales ne pouvant ou ne souhaitant pas s'opposer au héros d'Italie et d'Égypte. Le soir du 8 octobre, les navires jettent l'ancre dans la rade de Saint-Raphaël, qui dépend de Fréjus. Là encore, trop impressionnés par la qualité du jeune général, les conseillers municipaux laissent débarquer Bonaparte, qui, ignorant les règles sanitaires, rejoint ainsi rapidement Paris, où s'organisent l'arrivée et le triomphe du jeune général.

Sans doute est-ce là un des premiers coups de force contre la République, annonçant celui des 18-19 brumaire an VII (9-10 novembre 1799), qui mettra fin au Directoire. Bonaparte est pourtant loin d'être indifférent aux risques causés par les épidémies, d'autant que son arrivée au pouvoir est accompagnée d'une rumeur de contagion dans la capitale, signe des liens indissociables entre les questions politiques et sanitaires.

Durant l'hiver 1799, les autorités de la République du Directoire, à qui il ne reste que quelques semaines à vivre, sont alertées d'un risque d'épidémie « de nature pestilentielle »



dont semblent victimes les personnels soignants et les malades de l'hospice du nord de Paris (l'hôpital Saint-Louis). La menace est prise très au sérieux tant les dangers, réels ou supposés, des contagions alimentaires, des rumeurs et attisent les troubles au sein du Paris révolutionnaire. Le ministère de l'Intérieur et les autorités départementales ne tardent pas à envoyer des médecins, membres de la Commission des hospices civils et du Bureau central, pour endiguer la maladie et enquêter sur ses origines.

Rapidement, ces derniers démentent l'idée d'une peste. Si les personnels hospitaliers sont les premiers touchés, les malades,

Napoléon Bonaparte visitant l'hôpital des pestiférés de Jaffa, en Palestine, en mars 1799. C'est en 1804, à l'occasion de la proclamation de l'Empire, que le peintre Antoine-Jean Goussier, répondant à une commande officielle, présenta le tableau dont est tirée cette gravure, lequel conféra à la scène une dimension légendaire.



BIBLIOGRAPHIE

G. Bud, *Coté de Dieu, coté des hommes. La peste en Provence 1720-2020*, Cerf, 2020.

J.-C. Sournia, *La médecine révolutionnaire (1789-1830)*, Payot, 1989.

principalement des enfants, sont les principales victimes d'une « fièvre d'assez mauvaise nature », qui affaiblit considérablement les corps sans forcément provoquer la mort (sur les 140 enfants hospitalisés, 110 contractent la maladie et seulement 2 en meurent). Pour le médecin parisien F. Ruette, « il serait peut-être difficile de trouver une maladie épidémique qui ait été plus contagieuse et moins funeste ».

Loin de se contenter d'enquêter sur les origines d'une maladie qu'elles attribuent pour l'essentiel à la mauvaise qualité de l'air, les autorités politiques agissent : dans un premier temps en traitant les patients (médicaments, saignées...) ; dans un second temps en

réaménageant l'espace pour améliorer la circulation de l'air, éliminer les risques d'humidité et éloigner les « miasmes » des malades. En quelques semaines, les autorités parviennent ainsi à éteindre les risques d'épidémie et à rétablir le calme auprès des populations environnantes.

Pour ce faire, Bonaparte et ses partisans se lancent dans une vaste entreprise : celle de l'inoculation contre la variole selon les méthodes nouvelles inspirées par l'Anglais Edward Jenner. Ce dernier a rompu avec ses prédécesseurs en inoculant aux malades un pus provenant de vaches qui avaient contracté la vaccine, une maladie semblable, mais moins virulente que la variole.

Le vaccin est en effet conçu comme le moyen de concilier la lutte pour garantir la santé publique avec l'impératif d'ordre politique et de contrôle social des populations. La lutte contre l'épidémie ne dépend plus seulement d'une action sur l'air, les cours d'eau ou le milieu, mais repose désormais sur une intervention du pouvoir médical (et étatique) à l'intérieur même des corps : en empêchant la contagion et les désordres politiques et sociaux qu'elle entraîne, la vaccination doit ainsi « terminer la Révolution ».

Toutefois, dès 1802, le pouvoir bonapartiste doit faire face à un nouveau « front ». Pour réduire l'insurrection menée par le général Toussaint Louverture à Saint-Domingue, Bonaparte y a envoyé un corps expéditionnaire sous le commandement du général Leclerc. Or les soldats sont victimes d'une épidémie de fièvre jaune qui rend impossible la victoire sur la guérilla des esclaves et des libres de couleur. Peints sous les traits de « barbares » assouffis du sang des soldats français, les insurgés sont encore accusés de répandre des maladies contre lesquels les peuples « civilisés » doivent se défendre en faisant la guerre et en tournant le dos aux principes républicains mis en place depuis 1789.

Au XIX^e siècle, la relation entre épidémies et dynamiques politiques se poursuit au fil des différentes crises qui secouent la France. En particulier, l'épidémie de choléra de 1831 justifie, sous le Second Empire, la mise en œuvre des grands travaux du baron Haussmann : au nom de la lutte contre tous les foyers d'insalubrité qui empêchent la bonne circulation de l'air au sein de la capitale, il s'agit aussi de lutter contre la pauvreté et les « fléaux sociaux ». Hier comme aujourd'hui, un corps réduit de spécialistes ou de professeurs de médecine ne saurait confisquer la question des épidémies, de leurs effets et des mesures sanitaires à prendre dans l'espace politique. Cette question doit faire l'objet d'un large débat public si l'on veut empêcher qu'une crise sanitaire ne soit synonyme de tentation autoritaire. ■

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CNRS, à Gif-sur-Yvette



JEAN-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
au CNRS-Muséum, à Paris



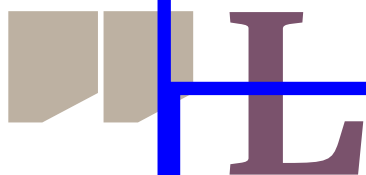
© 2020 Warner Bros. Entertainment Inc. Tous droits réservés/Chiabella James

Cette photo extraite de l'adaptation cinématographique de *Dune* par Denis Villeneuve (sortie prévue le 23 décembre 2020 en France) montre Paul et Jessica Atreides, deux des personnages principaux, portant un distille.

Le distille de «Dune», recycleur ultime



Dans le roman « Dune », de l'écrivain américain Frank Herbert, qui est une nouvelle fois porté à l'écran, les intrigues se cristallisent autour du contrôle de la planète désertique Arrakis. Pour survivre sur ce monde où il est crucial d'économiser l'eau, les habitants portent des « distilles », des combinaisons qui recyclent l'eau de la transpiration, de l'urine, etc. L'un des chapitres du livre « Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers », qui vient de paraître aux éditions Le Béal, interroge le réalisme de ces dispositifs. Extrait.



Le distille est sans aucun doute l'invention technique la plus originale de Frank Herbert. Porté et fabriqué par les Fremen, c'est à la fois un vêtement et un système de recyclage sophistiqué, indispensable à la survie d'un humain sur la chaude et désertique planète Arrakis. Le distille recouvre la totalité du corps, à l'exception d'une partie du visage, et fonctionne grâce à l'énergie corporelle de son porteur. Il permet de récupérer et de traiter l'humidité de l'haleine, de la transpiration, de l'urine et des excréments pour en recycler l'eau, qui sera stockée dans des poches où des tubes permettent au porteur du distille de s'abreuver. Selon Liet-Kynes, un distille en bon état et bien ajusté permet de ne pas «perdre plus d'un dé à coudre d'humidité par jour, même si vous venez à vous perdre dans le Grand Erg» [ndlr: les citations sont extraites du roman *Dune*]. Revêtir un distille demande une grande dextérité et lorsque Paul Atréides le fait de façon naturelle dès son arrivée sur Arrakis, le Planétologiste Impérial y verra un des signes de la prophétie de Muad'Dib: «Il connaît nos usages comme s'il était né avec eux.» En faisant jouer un rôle essentiel au distille, Frank Herbert a bien compris et intégré les enjeux de l'eau sur Arrakis, bien sûr, mais aussi sur notre planète.

L'EAU, UN FLUIDE VITAL

Constituant biologique fondamental, l'eau liquide est essentielle à tous les organismes vivants connus. Sur Terre, l'eau est présente sous ses trois états, solide, liquide et gazeux, et couvre 70% de sa surface. La très grande majorité de cette eau (97,2%) est maritime ou océanique et a été salée au fil du temps par la forte érosion continentale. L'eau douce est bien plus rare et résulte de la «distillation» solaire de l'eau océanique, qui s'évapore avant de retomber

pour partie sur les continents. L'eau douce ne représente que 2,8% de l'eau terrestre et se répartit de la façon suivante: 68,7% se trouvent dans les glaciers; 30,1% dans les nappes phréatiques; 0,8% dans le permafrost; 0,4% en surface et dans l'atmosphère. Au final, moins de 1% de l'eau est à la fois douce et liquide (le lac Baïkal, en Russie, est, avec ses 23 000 milliards de mètres cubes d'eau, le plus grand réservoir d'eau douce liquide de la surface de la planète). Un humain ne pouvant survivre plus de trois jours sans eau potable, l'accès à cette ressource relativement rare est un enjeu vital.

L'eau douce se répartit très inégalement, et neuf pays – le Brésil, la Colombie, la Russie, l'Inde, le Canada, les États-Unis, l'Indonésie, le Congo et la Chine – concentrent 60% du débit annuel mondial. Compte tenu de son caractère vital, de son importance économique (agriculture, industrie...) et de son inégale répartition sur Terre, l'eau douce est donc une ressource naturelle dont la gestion constitue l'objet de forts enjeux. Ainsi, risques climatiques et catastrophes naturelles peuvent être à l'origine d'une raréfaction ou d'une pollution de l'eau douce. Les activités humaines – rejets domestiques, agricoles ou industriels, détournement de cours d'eau, etc. – ont elles aussi des conséquences sur l'accès et la qualité des ressources en eau. Avec l'augmentation de la population mondiale, l'accès à l'eau est et restera durablement un enjeu stratégique majeur, et pourrait devenir la cause de guerres futures.

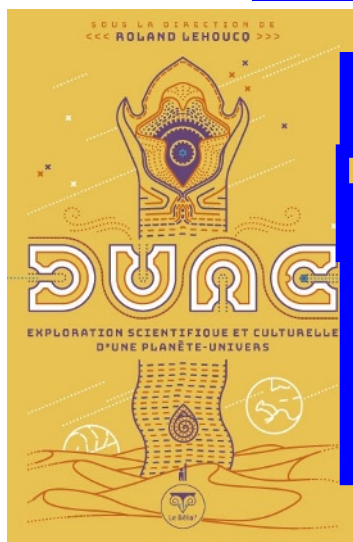
On comprend que sur la planète Arrakis l'eau ait une importance au moins égale à l'épice dans la galaxie [ndlr: l'«épice», substance imaginaire aux pouvoirs extraordinaires, ne pousse que sur Arrakis, d'où l'enjeu politique et économique qu'elle représente dans la saga *Dune*].

En aidant le duc Léo Atréides à ajuster son distille, Kynes décrit ainsi sa structure et son

LE REGARD DES SCIENTIFIQUES SUR UNE ŒUVRE INCONTOURNABLE

La saga de science-fiction *Dune*, parue en 1965, s'étend sur plusieurs volumes et raconte l'histoire d'une planète désertique où la science, la technologie et la culture sont parfaitement intégrées à l'intrigue et contribuent à rendre ce monde d'autant plus crédible. Il n'est pas surprenant que des scientifiques se penchent sur cette œuvre de référence de la science-fiction. Dans l'ouvrage *Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers*, Roland Lehoucq, Jean-Sébastien Steyer, Fabrice Chemla, Carrie Lynn Evans, Frédéric Landragin et d'autres éclairent de nos connaissances actuelles des sujets aussi variés que la technologie du «distille», les voyages à travers l'espace-temps, l'écosystème des vers géants, la chimie de l'«épice», la place des femmes ou encore la linguistique à partir de la langue des Fremen, les habitants de Dune.

Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers
de Bédial, 400 pages, 2020



fonctionnement: «À la base, c'est un micro-sandwich: un filtre à haute efficacité doublé d'un système d'échange de chaleur. [...] La couche au contact de la peau est poreuse, perméable à la transpiration qui rafraîchit le corps... c'est le processus normal, ou presque, de l'évaporation. Les deux autres couches comprennent [...] des filaments d'échange calorifique et des précipitateurs de sel. Le sel est récupéré. [...] Les mouvements du corps, et surtout la respiration, ainsi qu'un certain effet osmotique suffisent à fournir l'énergie nécessaire au pompage. [...] L'eau recircule et aboutit dans des poches de récupération d'où vous l'aspirez grâce à ce tube fixé près de votre cou. [...] L'urine et les matières fécales sont traitées dans le revêtement des cuisses.»

Le nom de cette tenue évoque bien sûr la distillation, procédé attesté depuis le III^e siècle de notre ère et faisant partie des techniques inventées par les alchimistes, encore en usage en chimie moderne (alliage, calcination, sublimation et distillation). La distillation permet de séparer un mélange homogène de liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. En chauffant le mélange et en diminuant la pression qui le surpasse, les liquides qu'il contient se vaporisent successivement en commençant par le plus volatil. La vapeur obtenue est condensée par refroidissement sur les parois rafraîchies d'un tube de captage au bout duquel s'écoule le distillat. Ainsi, la préparation d'une eau-de-vie passe par la distillation du résultat de la fermentation des fruits par des levures afin d'en extraire l'alcool. Cela semble tout à fait opportun de nommer «distille» (*stillsuit* en anglais) une tenue qui semble capable de purifier l'eau évacuée par le corps en lui ôtant les sels et autres impuretés qu'elle contient.

Comme l'eau douce risque de devenir une denrée rare sur Terre et qu'elle est très coûteuse à embarquer à bord des stations orbitales ou des futures missions humaines vers Mars, il ne fait aucun doute qu'un tel système de recyclage individuel pourrait s'avérer fort utile. Mais cela fonctionnerait-il comme nous l'indique Kynes

L'EAU CORPORELLE

Notre corps contient 65% d'eau dont la plus grande part siège à l'intérieur des cellules. Nous perdons en moyenne 2,5 litres par jour sans bien sûr en cas d'effort physique intense ou de conditions météorologiques extrêmes: 1,5 litre d'eau est évacué sous forme d'urine, 0,5 litre est transpiré en sueur, 0,3 litre s'échappe sous forme de vapeur d'eau dans la respiration et 0,2 litre se retrouve dans les selles. L'eau ainsi perdue est récupérée par l'alimentation (1 litre) et par les boissons (1,5 litre). L'eau douce est absolument indispensable à notre survie car sans aucun apport, rappelons-le, nous ne pouvons vivre plus de trois jours.

VIVRE SANS EAU, EST-CE POSSIBLE ?

Sur Arrakis, la survie de chacun dépend de l'eau, un bien précieux extrêmement rare sur cette planète désertique. Mais une espèce imaginée par Frank Herbert, adaptée à la réalité, survit sans eau (ou ver des sables) pour lequel l'eau est un poison mortel. La fiction est néanmoins rattrapée par la réalité. Sur Terre, il existe des extrémophiles capables de se passer d'eau. Par quels mécanismes parviennent-ils à survivre dans ces conditions ?

L'eau couvre 70 % de la surface de notre planète, et dans sa forme liquide, elle joue un rôle crucial pour les êtres vivants : ce solvant assure le transfert de matière et d'énergie à l'intérieur même des cellules entre elles. Ainsi, le corps humain est constitué de 65 % d'eau, mais cette fraction s'élève jusqu'à 98 % chez les méduses ! Bien que l'eau semble indispensable, de nombreuses formes de vie sont capables de s'en passer au moins pendant un temps : c'est le cas des espèces dites « anhydrobiotiques » comme les levures, les plantes à graines avec leurs graines, les bactéries, les champignons avec leurs spores, et bien d'autres. Les artémies, de petits crustacés, sont capables de résister à la dessiccation pendant quinze ans sous la forme de cystes (ou kystes).

Concernant l'hygrométrie, le record sur Terre est, comme sur Arrakis, détenu par un ver, le nématode *Tylenchus* peut rester trente-neuf ans sans eau et sans aucun dommage pour l'organisme. En général, ces vers se plissent, s'enroulent sur eux-mêmes et

s'agglutinent tandis que leurs fonctions vitales ralentissent, voire s'arrêtent. Leurs tissus se déshydratent et l'eau intracellulaire est remplacée par des protéines spécifiques (protéines de choc thermique) et du tréhalose, un sucre non réducteur très visqueux qui permet de conserver un volume intracellulaire minimum tout en limitant les agrégats de biomolécules.

Le tréhalose est aussi à l'œuvre chez les artémies, mais semble absent chez les tardigrades, qui peuvent rester plusieurs décennies dans un état de dessiccation quasi totale après avoir perdu 97 % de leur eau. Ces animaux microscopiques sont par ailleurs capables de résister à des températures et des pressions extrêmes, à une forte salinité, au vide spatial et à une radioactivité hors norme. En 2017, Thomas Boothby, de l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis, et ses collègues ont montré qu'en cas de sécheresse, les tardigrades produisent des protéines intrinsèquement désordonnées, qui forment une matrice vitrifiée protégeant les cellules. Les Shai-huluds ont-ils développé une stratégie similaire ? Quoi qu'il en soit, ces extrémophiles, réels ou fictifs, suggèrent que l'eau n'est peut-être pas obligatoire pour imaginer d'autres formes de vie ailleurs dans l'Univers.

T. C. Boothby et al., *Molecular Cell*, vol. 62(1), pp. 15-31, 2017;
M. Watanabe, *Applied Entomology*, vol. 41(1), pp. 15-31, 2006.



LES TARDIGRADES

On les surnomme parfois « ours d'eau ». En fait, ces animaux peuvent vivre sans eau pendant de longues périodes, au moins cinq ans pour la plupart des espèces. Ils se mettent alors dans un état dit « d'cryptobiose », où leur métabolisme est presque à l'arrêt.

> Si la présence d'eau dans les urines ou les selles est manifeste, c'est le médecin italien Santorio Santorio (1561-1636) qui mit en évidence la perspiration, c'est-à-dire la perte d'eau sans sueur apparente par évaporation directe à travers la peau et les alvéoles pulmonaires (vapeur d'eau contenue dans l'air expiré). Cette évaporation participe à la dissipation des 70 à 90 watts de chaleur produite par notre métabolisme au repos.

La transpiration (ou sudation) est un phénomène plus visible que la perspiration, et, comme cette dernière, se produit au niveau des pores de la peau. Les glandes sudoripares situées dans la peau «puisent» l'eau dans les capillaires sanguins qui les entourent, et produisent la sueur dont la composition est proche de celle d'une urine très diluée. Celle-ci est ensuite évacuée par les pores cutanés. En prenant l'énergie nécessaire à son évaporation dans la chaleur corporelle, la sueur joue un rôle important dans la régulation thermique de notre corps en cas d'effort ou de chaleur. C'est aussi le processus d'évaporation de l'eau mouillant notre corps qui provoque la sensation de froid en sortant d'une douche). La sudation peut alors atteindre des valeurs aussi hautes que 1,5 litre par heure! D'où l'importance de boire beaucoup lorsque l'on exerce une activité physique intense ou lorsqu'il fait très chaud. Dans ces situations, les animaux transpirant moins, comme le chien, halètent pour évacuer de l'eau par la surface de leur langue afin de maîtriser leur température interne.

Les humains ont deux sortes de glandes sudoripares qui diffèrent par leurs fonctions et par la composition de la sueur qu'elles produisent. Les glandes eccrines sont les plus nombreuses (on en compte de trois millions à six millions) et couvrent presque tout le corps. Elles se situent surtout sur la paume des mains, la plante des pieds et le front. On comprend donc pourquoi le distille dispose d'une capuche et couvre aussi les mains et les pieds. Les glandes apocrines, que l'on trouve notamment sous les aisselles, produisent une sueur plus riche en molécules organiques (dont des phéromones). Leur transformation par des bactéries produit l'odeur typique de la transpiration. Thufir Hawat, le Mentat des Atréides, ne réagit d'ailleurs pas ses mots à propos de l'odeur d'un distille: «[...] ils puent autant les uns que les autres dès qu'ils sont en lieu clos. C'est à cause de ce vêtement qui récupère l'eau de leur corps. Ils appellent ça un "distille".»

Le fonctionnement du distille n'est bien sûr pas détaillé par Frank Herbert, mais il semble difficile qu'il atteigne les performances décrites. D'emblée se pose le problème de la récupération de la sueur: elle passe à travers une membrane poreuse pour être ultérieurement filtrée. Mais si la sueur est directement

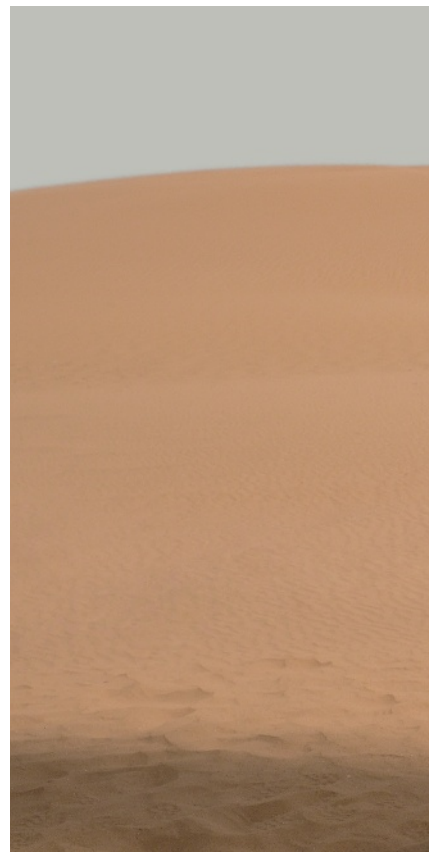
captée sous forme liquide, elle ne jouera plus son rôle refroidissant faute de pouvoir s'évaporer, ce qui est fâcheux. Les plongeurs portant une combinaison intégrale en néoprène savent bien qu'il est dangereux de rester trop longtemps au soleil: sans évaporation de la sueur pendant une période prolongée, ils courent un risque très important d'hyperthermie provoquant étourdissements, nausées, vomissements et maux de tête. D'ailleurs, dans le film *Dune* de David Lynch (1984), les figurants jouant les Fremen portaient un costume très près du corps et peu «respirant» qui limitait l'évaporation de la sueur. Dans le désert mexicain où furent tournées les scènes sur Arrakis, tous s'accordèrent à dire que l'expérience fut très éprouvante.

COMMENT LE DISTILLE POURRA-T-IL FONCTIONNER?

Si le distille permet l'évaporation de la sueur et le refroidissement naturel du corps, il doit aussi évacuer l'air saturé en vapeur d'eau en contact avec la peau pour le remplacer par de l'air sec à la bonne température. Dans le cas contraire, l'évaporation, et donc le refroidissement, s'arrêterait: c'est pour cette raison qu'il est utile d'aérer une pièce dans laquelle sèche du linge. Reste ensuite à condenser l'humidité avant de la traiter. La façon la plus évidente consiste à refroidir la vapeur d'eau: c'est ce qui se passe lors de la formation d'un brouillard par refroidissement d'un air humide.

Dans cette situation, capter les fines gouttelettes d'eau contenues dans le nuage et la brume est réalisable grâce à un long fil et de polypropylène constitué de mailles très fines. Cette méthode est expérimentée dans les régions arides du Chili et du Pérou, où l'accès à l'eau potable demeure difficile mais le brouillard régulier. Elle fut aussi utilisée par les Romains dans le pourtour méditerranéen grâce à des tumulus pierreux plutôt qu'avec des filets. Cela ressemble tout à fait aux «pièges à vent» que Kynes père et fils installent sur Arrakis pour capter l'humidité de l'air.

Dans le distille, la déshumidification de l'air capté au voisinage de la peau doit aussi se



Sur la Station spatiale internationale, les eaux usées sont recyclées à plus de 90%



Dans le roman *Dune*, le personnage de Liet Kynes (ici dans l'adaptation cinématographique de Denis Villeneuve) joue un rôle central. Cette planétologue a une compréhension profonde d'Arrakis et veut terraformer ce monde. L'eau est donc un élément essentiel dans son projet.

faire par condensation. Mais dans ce processus, la vapeur d'eau libère très exactement la quantité d'énergie qui a été nécessaire à son évaporation ! Cela provoque alors le refroidissement de la surface sur laquelle les gouttes se forment. Pour que la condensation n'annule pas l'effet refroidissant de la transpiration, il faut que le distille soit doté d'un dispositif d'évacuation rapide de cette chaleur, sinon son porteur risque de mourir de chaud. Pour cela, le distille doit être constitué d'un matériau ayant à la fois une forte conductivité thermique (de sorte à faciliter le transfert de chaleur vers l'extérieur), une grande émissivité radiative (pour rayonner efficacement la chaleur sous forme de lumière infrarouge), et posséder une grande surface d'échange avec l'air ambiant, comme on le voit sur les radiateurs d'automobile ou sur ceux utilisés pour refroidir les composants électroniques. Afin d'éviter que la surface extérieure du distille ne soit couverte d'ailettes disgracieuses et gênant les mouvements de son porteur, on peut imaginer que cette surface soit fractale de sorte à augmenter l'aire d'échange avec l'extérieur sans trop augmenter le volume du distille.

La découverte faite par le physicien Jean-Charles Peltier (1785-1845) en 1834 pourrait aussi s'avérer utile. Il s'agit d'un effet thermoélectrique dans lequel un courant électrique provoque une différence de

température. Il se produit dans des matériaux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions. L'une des jonctions se refroidit alors légèrement, pendant que l'autre se réchauffe. L'effet Peltier est utilisé comme technique de réfrigération dans des secteurs où une grande fiabilité est requise (dans le domaine spatial, par exemple), mais aussi pour des applications plus courantes comme les glacières et les réfrigérateurs de camping. La partie externe du distille pourrait alors être constituée d'une jonction Peltier, la partie intérieure froide condensant la vapeur d'eau, la partie extérieure se chargeant d'évacuer la chaleur produite par la condensation.

LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

En plus de la vapeur, le distille est aussi capable de récupérer l'eau des excréments humains. Sécrétée par les reins après filtration du sang, l'urine est composée à 95% d'eau, le reste étant essentiellement de l'urée (2%), des sels dissous et des molécules organiques (elle en contient plus de 3000 différentes !). Le recyclage de l'eau des urines a bien sûr été largement étudié par les agences spatiales, par exemple afin de réduire le coût d'approvisionnement en eau de la Station spatiale internationale (*International Space Station* ou ISS). Le recyclage de toutes les eaux usées à plus de 90% n'évite pourtant pas l'envoi en orbite de près de six tonnes d'eau chaque année.

Dans l'ISS, l'urine est d'abord distillée à basse pression dans un cylindre en rotation pour pallier l'absence de gravité apparente. L'eau obtenue est ensuite mélangée avec celle provenant d'autres sources (douche ou vapeur d'eau condensée dans l'air) avant de transiter à travers une série de filtres. Enfin, les contaminants organiques et les micro-organismes sont détruits en passant dans un réacteur catalytique qui les oxyde avant une ultime filtration. L'eau obtenue peut être bue, mais elle sert également à la production de dioxygène par électrolyse.

Les selles sont aussi riches en eau : elles en contiennent environ 80%, le reste étant essentiellement des fibres de cellulose ou musculaires non digérables. Contrairement à l'urine, les selles sont plus difficiles à recycler car elles sont susceptibles de contenir des germes contaminants. Des recherches menées pour l'établissement d'une future colonie martienne ont montré que, finalement, assez peu d'eau pourrait être récupérée des selles. Cela, sans compter les problèmes psychologiques que cela poserait certainement à l'équipage qui devrait la consommer (dans la Station spatiale internationale, les astronautes russes refusent déjà de boire l'eau issue du recyclage des urines). Naturellement, si l'unique alternative est la mort par déshydratation, leur opinion pourrait changer...

> Dans sa description du distille, Kynes mentionne un filtre à haute efficacité ayant une structure en microsandwich, ce qui évoque les méthodes les plus récentes de purification de l'eau par ultrafiltration ou par nanofiltration. Dans la première méthode, l'eau passe sous pression à travers une membrane constituée d'un faisceau de fibres creuses conçues dans un matériau polymère dont les pores ont une taille de l'ordre d'un centième de milliardième de mètre (0,01 micromètre). Les seules substances capables de passer sont donc celles dont la taille est inférieure à celle des pores. L'ultrafiltration permet ainsi d'éliminer toutes les particules en suspension, les bactéries et les virus, ainsi que les plus grosses molécules organiques. Pour retenir les plus petites molécules, on ajoute du charbon actif dans l'eau à traiter. Celles-ci s'adsorbent sur les grains de charbon, lesquels sont trop gros pour passer à travers les pores, sont retenus par la membrane. La nanofiltration fonctionne comme l'ultrafiltration, mais en utilisant une membrane dont la porosité est dix fois plus faible, de l'ordre du milliardième de mètre (un nanomètre, d'où son nom). Cette membrane est en céramique et se présente sous la forme de longs prismes hexagonaux percés de multiples canaux dans le sens de la longueur.

Ces dispositifs d'ultra et de nanofiltration équipent la station scientifique française Concordia, située en Antarctique. Elles sont complétées par un autre procédé, l'osmose inverse, déjà utilisée pour le dessalement de l'eau de mer. Ce système, financé par l'Agence spatiale européenne, permet de recycler les eaux usées d'environ 25 personnes vivant en autonomie complète pendant les neuf mois d'hivernage.

COMMENT ALIMENTER LE DISTILLE ?

La purification de l'eau nécessite évidemment de l'énergie : un système d'ultrafiltration commercial consomme environ 1 kilowatt-heure pour purifier un mètre cube d'eau, valeur qui monte à 3 kilowatt-heures pour un dispositif utilisant l'osmose inverse. La quantité d'eau à traiter étant d'environ quelques litres par jour, la conduite, en se donnant un peu de marge, nécessite une puissance nécessaire de l'ordre de 200 milliwatts pour la seule purification, à laquelle il faut ajouter la consommation du système de pompage et de refroidissement. D'après Kynes, le distille fonctionne uniquement grâce à l'énergie du corps humain, notamment celle des mouvements. Est-ce vraiment envisageable ?

En 2013, quatre étudiants de l'université de Rice, au Texas, ont imaginé des chaussures qui transforment en électricité l'énergie produite par le choc des talons sur le sol. Une idée qui semble tout à fait intéressante quand on se rappelle que ce sont des pompes situées sous le talon qui sont censées faire circuler l'eau dans

Moins de 1% de l'eau terrestre est à la fois douce et liquide

le distille. Le prototype a une puissance moyenne de 400 milliwatts, mais sur un sol dur et dans des conditions de laboratoire parfaites sur le sable des déserts d'Arrakis ! Et quand on sait que les Fremen doivent soigneusement choisir le rythme de leur marche pour ne pas attirer l'attention des vers des sables, il faut craindre que la production d'énergie par ce biais ne soit pas suffisante. On peut aussi récupérer l'énergie liée aux mouvements de l'ensemble du corps (du tronc, des bras ou des jambes : cette question est désormais à l'ordre du jour pour alimenter les dispositifs numériques qui envahissent nos vies, du téléphone portable au vêtement connecté).

L'ordre de grandeur de la puissance mécanique de la majorité des mouvements est de l'ordre de 1 à 10 watts, à comparer aux 20 à 100 milliwatts nécessaires aux objets connectés, et aux 200 milliwatts pour notre distille.

Si la puissance disponible semble être suffisante, la récupérer de façon efficace n'est pas si simple. Il existe deux grandes familles de récupérateurs de l'énergie d'une personne, caractérisées par la nature de l'énergie mécanique convertie. Un système inertiel contient une masse en déplacement libre sous l'effet des accélérations du corps de l'utilisateur. Un générateur transforme l'énergie cinétique de la masse en électricité. La seconde famille est constituée de systèmes qui exploitent directement les contraintes, les déformations ou les frottements. La source d'énergie mécanique est alors la force musculaire de la personne. Dans un système inertiel, l'ergonomie impose de réduire au maximum le volume et la masse du récupérateur d'énergie, ce qui limite de fait la quantité d'énergie mécanique convertible. En revanche, pour les systèmes directs, la limite est fixée par la quantité d'énergie maximale qu'il est possible de prélever sans entraver le mouvement. En pratique, ces dispositifs de récupération de l'énergie mécanique du corps ne sont capables de fournir, au mieux, qu'une puissance de l'ordre de quelques dizaines de milliwatts.

C'est un peu juste, mais il ne semble malgré tout pas totalement impossible de faire fonctionner un distille à l'énergie humaine : bien joué, monsieur Herbert !

BIBLIOGRAPHIE

Recyclage de l'eau à bord de la Station spatiale internationale, <http://bit.ly/PLS517>, ISS

M. Geisler, Récupération d'énergie mécanique pour vêtements connectés autonomes, mémoire de thèse, 2017 (<http://bit.ly/PLS517>, vêtements).

L'eau : attention, fragile !, Dossier Pour la Science n° 36, janvier 2008.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

FORMULE PAPIER

FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE

FORMULE INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

Votre cadeau : le livre *Pourquoi le Soleil brille*
de Roland Lehoucq (37931069)

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour la Science – 26 Bd President Wilson - CS40032 – 67085 Strasbourg Cedex – email: pouirlascience@abopress.fr

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

RG20NOE

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

FORMULE

☐ **PAPIER**

• 12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU

4,90€
PAR MOIS

DIV4E90K8

FORMULE

☐ **+ HORS SÉRIE**

• 4 Hors-série papier
+ UN CADEAU

6,50€
PAR MOIS

PV6E50K15

FORMULE INTÉGRALE

• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne
+ UN CADEAU

8,20€
PAR MOIS

W8E20K15

2 / Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Code postal : Ville :

Tél. :

E-mail : @
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon 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.

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque)

IBAN

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75006 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter le site pouirlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,50 € et

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

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

4 / MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Ne rien inscrire

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

DES FONCTIONS MONSTRUEUSES MAIS UTILES

En imaginant des fonctions bizarres et au comportement inhabituel, les mathématiciens mettent à l'épreuve leurs intuitions. Ces fonctions se révèlent aussi pertinentes pour modéliser certains phénomènes naturels.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite

et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



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

Les mathématiciens ont longtemps associé l'idée de continuité d'une fonction (et de son graphe) et l'existence de tangentes aux points du graphe, et ils pensaient que ces tangentes existaient partout hormis en quelques points isolés quand la fonction est continue. André-Marie Ampère tenta en 1806 de le démontrer, mais échoua. En fait, l'hypothèse était fautive : il existe des fonctions continues dont le graphe n'a de tangente en aucun point !

Au début, ces fonctions « monstrueuses » ont gêné les mathématiciens. Ainsi, en 1893, Thomas Stieltjes écrivait à Charles Hermite : « Je me détourne avec effroi et horreur de cette pléiade lamentable des fonctions continues qui sont sans dérivée. » Henri Poincaré lui-même n'aimait pas ces fonctions tétalogiques et les considérait comme un jeu stérile et irrespectueux des relations : « La logique parfois engendre des monstres. On a vu surgir toute une foule de fonctions bizarres qui semblaient s'efforcer d'assez sembler aussi peu que possible aux hommes des fonctions qui servent à quelque chose. Plus de continuité, ou bien de la continuité, mais pas de dérivées. [...] Autrefois, quand on inventait une fonction nouvelle, c'était en vue de quelque but pratique ; aujourd'hui, on les invente tout espérances pour mettre en défaut les raisonnements de nos pères, et on n'en tirera jamais que cela. »

Le jugement des mathématiciens a bien changé ! Ils considèrent aujourd'hui que ces fonctions inattendues sont des garde-fous utiles,

car non seulement connaître leur existence nous évite de tenter des démonstrations impossibles, mais elles affinent notre compréhension des concepts de continuité et de dérivabilité.

De plus, ces fonctions monstrueuses sont à l'origine de la géométrie fractale, qui sert à modéliser toutes sortes de phénomènes naturels, le mouvement brownien par exemple. Finalement nous savons maintenant que ces « monstres » sont présents dans l'univers physique et ne sont en rien artificiels. Nous allons en présenter quelques-uns pour le plaisir de l'étonnement.

DISCONTINUITÉ MAXIMALE

La notion de continuité s'envisageait d'abord globalement. Par exemple, les fonctions $x \mapsto x^2$ ou $x \mapsto \sin(x)$ sont continues partout où elles sont définies, c'est-à-dire sur l'ensemble des nombres réels. Pourtant, en approfondissant notre compréhension, on a découvert que la continuité était une notion ponctuelle : on peut définir la continuité en un point, et en chaque point de son ensemble de définition une fonction peut être continue ou non.

Nous nous limiterons aux fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ et distinguerons parmi les nombres réels les nombres rationnels, de la forme p/q où p et q sont des entiers, comme $0,4 = 2/5$, et les nombres irrationnels qui ne peuvent se représenter sous cette forme, comme $\sqrt{2}$. La façon la plus simple de définir la continuité est de dire que f est continue au point x si, à chaque fois que >

LA FONCTION POP-CORN DE THOMAE ET LE VERGER D'EUCLIDE

La fonction pop-corn g du mathématicien allemand Carl Thomae est définie pour tout nombre réel x par :

(2) si x est rationnel, c'est-à-dire si $x = p/q$ avec p et q entiers sans diviseur commun autre que 1, alors $g(x) = 1/q$.

Cette fonction saute sans cesse de valeurs positives à des valeurs nées et inversement. Cependant, quand x est proche d'un nombre irrationnel, les fractions p/q ne peuvent pas avoir un petit dénominateur, et donc $1/q$ est de plus en plus petit. En effet, près d'un irrationnel x , arrive un moment où un rationnel ne peut avoir un dénominateur 2, car x se trouve à 1 fois éloigné de 0, $1/2$, 1, $3/2$, etc. De même, arrive un moment où

rationnel ne peut avoir pour dénominateur 3, etc. Donc quand une suite de rationnels s'approche d'un irrationnel, les dénominateurs augmentent.

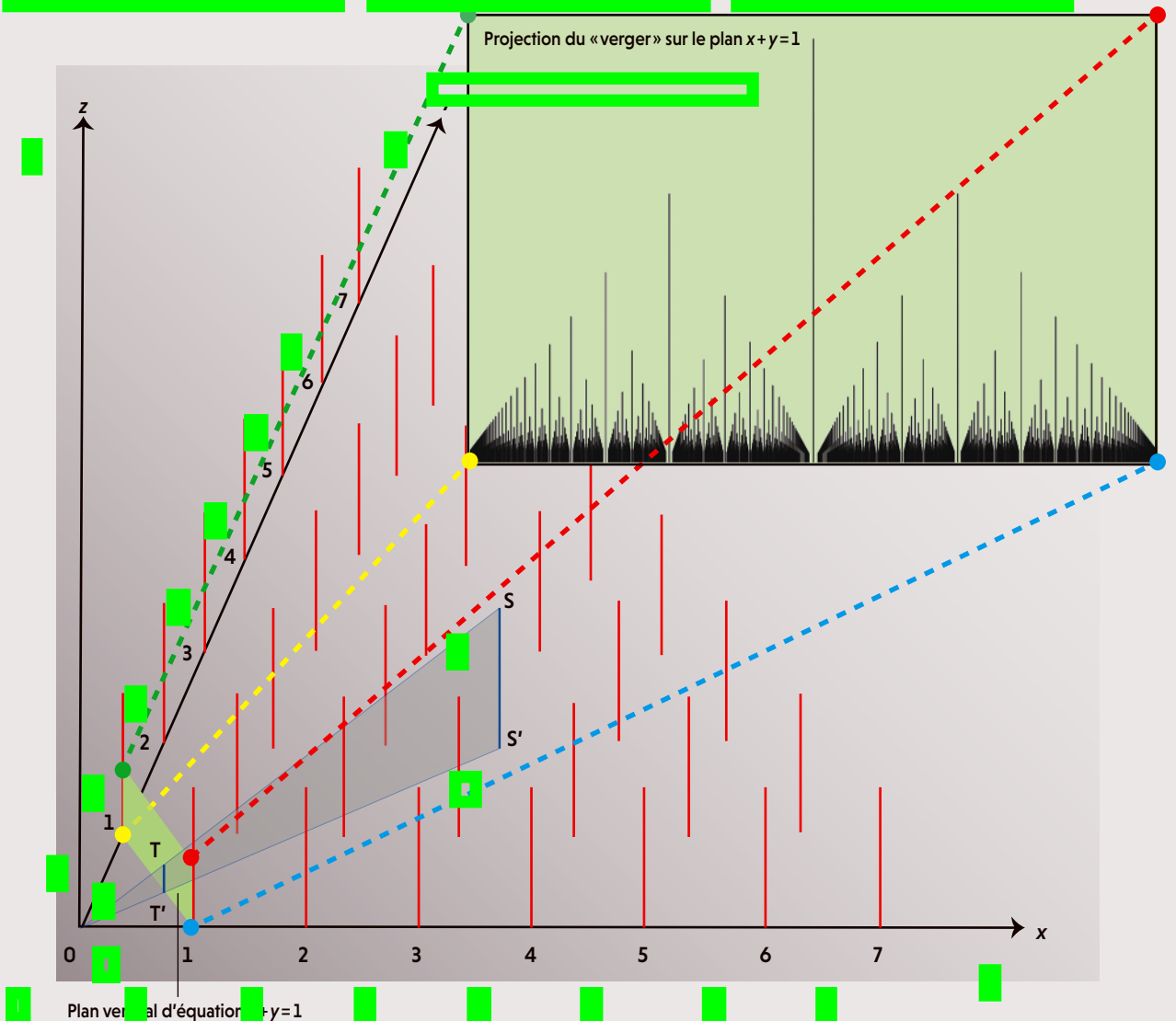
La conséquence est que g est continue en x si x est irrationnel. La fonction g passe donc sans cesse de points où elle est continue (les irrationnels) à des points où elle est discontinue (les rationnels) et inversement.

On rencontre cette fonction en physique et en géométrie. Le « verger d'Euclide » est un plan couvert d'arbres (des segments de longueur 1) placés verticalement aux points de coordonnées (p, q) du plan $z = 1$. Projets chaque segment-arbre sur le plan vertical d'équation $x + y = 1$ par une homothétie de

centre $(0, 0)$ et de rapport $p + q$. La longueur de la projection TT' de l'arbre S est $1/(p + q)$.

Tout couple d'entiers positifs (p, q) peut s'écrire sous la forme $(m, m - n)$, m et n positifs, en prenant $n = p$ et $m = p + q$. Donc, en considérant tous les arbres du verger d'Euclide en position $(n, m - n)$, on a bien tous les arbres et la projection de tous ces arbres sur le plan $x + y = 1$ donne tous les points du graphe de la fonction $g(x)$, la hauteur $1/m$ de l'arbre étant la valeur de la fonction g pour les x rationnels. Les points du graphe de g pour les x irrationnels sont sur l'axe des x .

Regarder le verger d'Euclide sur le plan d'équation $x + y = 1$ est donc équivalent à regarder le graphe de la fonction g de Carl Thomae !



> L'on dispose d'une suite (x_n) qui converge vers x , alors $f(x_n)$ converge vers $f(x)$: si y s'approche de x , alors $f(y)$ s'approche de $f(x)$. Puisque la notion est définie en tout point, vient la question : se peut-il qu'une fonction soit l'opposée d'une fonction continue en tout point, c'est-à-dire qu'elle ne soit continue en aucun point ?

Oui, c'est possible. Si l'on considère la fonction $f(x) = 1$ si x est irrationnel, $f(x) = 0$ si x est rationnel, on en a un exemple. Cette fonction est nommée « fonction de Dirichlet » en l'honneur du mathématicien prussien Gustave Lejeune Dirichlet qui l'envisagea en 1829. Elle n'est pas continue en x si x est rationnel, car $f(x) = 0$ et donc en s'approchant de x par des irrationnels, $f(y)$ vaut 1 et ne s'approche pas de $f(x)$. Et elle n'est pas continue en x si x est irrationnel car $f(x) = 1$, donc en s'approchant de x par des rationnels y , $f(y)$ qui vaut 0 ne s'approche pas de $f(x)$. La fonction saute sans cesse de 0 à 1 et de 1 à 0, car entre deux rationnels y il y a toujours des irrationnels, et entre deux irrationnels, il y a toujours des rationnels.

On dit qu'un sous-ensemble E de $\mathbb{R}$ est dense dans $\mathbb{R}$ si tout point de $\mathbb{R}$ peut être approché avec autant de précision qu'on le veut

par des points de E . L'ensemble $\mathbb{Q}$ des rationnels est dense dans $\mathbb{R}$, mais c'est aussi le cas de son complémentaire, l'ensemble des irrationnels. Il en va de même pour l'ensemble des nombres décimaux (ceux dont l'écriture en base 10 est finie, comme 0,25 ou 7,4321). Si E est un sous-ensemble de $\mathbb{R}$ dense dans $\mathbb{R}$, et si le complémentaire de E est lui aussi dense dans $\mathbb{R}$, alors toute fonction qui vaut 1 sur E et 0 ailleurs sera, comme la fonction de Dirichlet, discontinue partout.

UNE FONCTION CONTINUE EN TOUT POINT IRRATIONNEL ET DISCONTINUE AILLEURS

Une seconde question un peu plus subtile va produire un résultat vraiment surprenant : les points où une fonction est continue sont-ils groupés ? On pourrait penser que oui, mais c'est faux. En effet, il existe une fonction g qui est continue en tout point irrationnel et discontinue en tout point rationnel. Elle saute sans cesse de la continuité à la non-continuité. Entre deux points où cette fonction g est continue, aussi proches soient-ils, il y a toujours un point où la fonction est discontinue, et inversement.

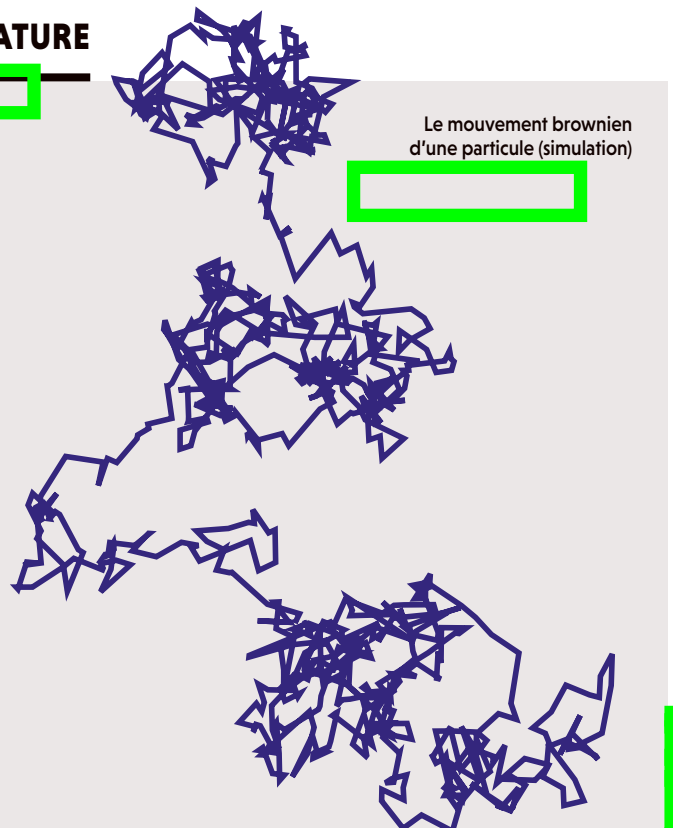
2

DES MONSTRES RENCONTRÉS DANS LA NATURE

Les fonctions monstrueuses ont étonné les mathématiciens et les ont effrayés, et parfois détestées car elles semblaient ne pas se plier à ce qu'on attend des bonnes fonctions rencontrées dans la nature. Cependant,

uniquement en mathématiques à comprendre ce qui résulte des définitions et ce qui n'en résulte pas, on s'est aperçu dans un second temps qu'elles sont aussi utiles pour modéliser le monde physique. Jean Perrin fut le premier, en 1913, à percevoir et défendre cet intérêt : « Si les fonctions à dérivée sont les plus simples, les plus faciles à traiter, elles sont pourtant l'exception. Ou, si l'on préfère en langage géométrique, les courbes qui n'ont pas de tangente sont la règle, et les courbes bien régulières, telles que le cercle, sont des cas fort intéressants mais très particuliers. [...] Mettant l'œil au microscope, nous observons le mouvement brownien qui agite une toute petite particule en suspension dans un fluide. Pour fixer une tangente à sa trajectoire, nous devons trouver une limite au moins approximative à la direction de la droite qui joint les positions de cette particule en deux instants successifs très rapprochés. Or, tant que l'on peut faire l'expérience, cette direction varie follement lorsque l'on fait décroître la durée qui sépare ces deux instants. En sorte que ce qui est suggéré par cette étude à l'observateur sans préjugé, c'est encore la fonction sans dérivée, et pas du tout la courbe avec tangente. »

Benoît Mandelbrot a défendu cette idée d'une géométrie incluant ces courbes irrégulières sans tangente et il a démontré qu'on en rencontrait partout, en physique, en économie, en biologie...



Le mouvement brownien d'une particule (simulation)

3

L'ESCALIER DU DIABLE

La fonction g qui réalise cet exploit a été proposée en 1875 par le mathématicien allemand Carl Johannes Thomae. Parfois dénommée «fonction pop-corn» à cause du dessin de son graphe (voir l'encadré 1), elle est définie par

$g(x) = 0$ si x est irrationnel;
 $g(x) = 1/q$ si x est rationnel avec $x = p/q$, où p et q sont des entiers sans diviseur commun autre que 1.

Autrement dit, quand x est rationnel, pour trouver g , on simplifie d'abord le plus possible x . Voici deux exemples: $g(6/9) = g(2/3) = 1/3$
 $g(80/100) = g(8/10) = g(4/5) = 1/5$.

La continuité en x irrationnel est facile à comprendre:

a) Quand tous les y_n sont irrationnels et que les valeurs y_n s'approchent d'un nombre irrationnel x , il y a continuité puisque $g(y_n) = 0 = g(x)$.

b) Quand tous les y_n sont rationnels (donc de la forme p/q) et s'approchent d'un nombre irrationnel x , alors plus y est proche de x plus il faut utiliser des fractions ayant un grand dénominateur q , et donc $g(p/q) = 1/q$ tend vers 0.

c) Quand y s'approche d'un nombre irrationnel x en utilisant à la fois des rationnels et des irrationnels, on a pour $g(y)$ un mélange de 0 et de $1/q$ qui tendent vers 0, et donc $g(y)$ tend vers 0.

Quant à la discontinuité de g en un point rationnel $x = p/q$, elle est évidente, car $g(x) = 1/q > 0$ et il y a, aussi près de x qu'on le souhaite, des irrationnels y pour lesquels $g(y) = 0$.

La fonction de Thomae paraît artificielle. Ce n'est pourtant pas le cas, car c'est son graphe que l'on voit quand on regarde le verger d'Euclide.

Ce verger est l'idée mathématique d'un champ infini planté d'arbres régulièrement espacés de même hauteur: en chaque point à coordonnées entières, il y a un arbre modélisé par un segment de droite vertical de longueur 1, le bas du segment étant sur le plan horizontal d'altitude 0. Imaginons que l'on place l'œil au niveau du sol au point (0, 0) et que l'on regarde le verger d'Euclide. Certains arbres en cachent d'autres. Par exemple, l'arbre en (1, 1) cache l'arbre en (2, 2), l'arbre en (3, 3), etc. En fait, les seuls arbres que l'on voit sont ceux positionnés en (p, q) où p et q sont sans diviseur commun autre que 1. C'est que l'on voit en projetant sur le plan vertical perpendiculaire à la première diagonale (ce plan a pour équation $x+y=1$) est alors le graphe de la fonction g de Thomae (voir l'encadré 1).

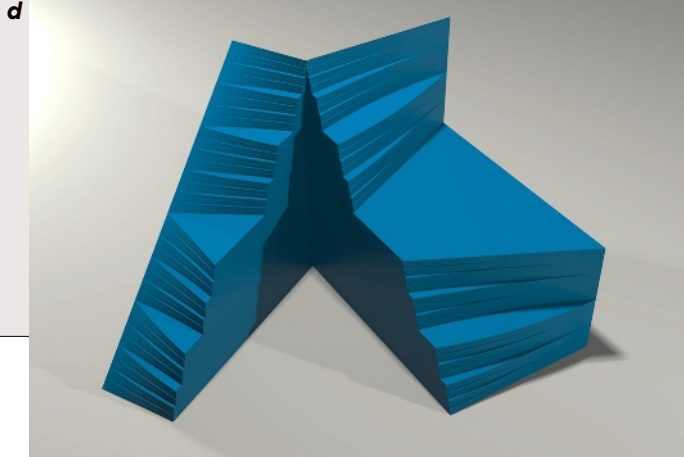
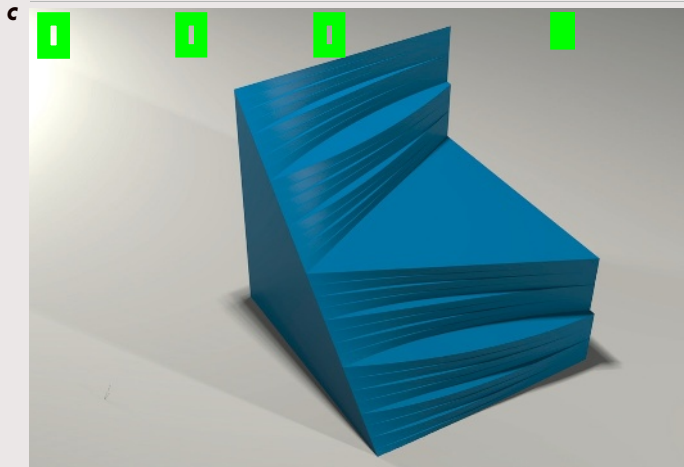
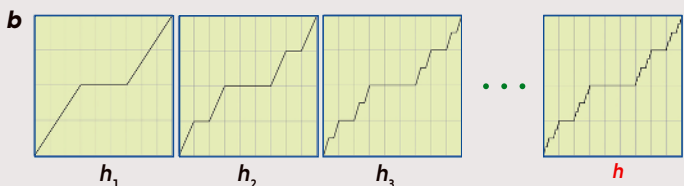
Des exemples de fonctions qui ressemblent à celle de Thomae ont été rencontrés en physique (voir les articles de Sergei Nechaev et Kirill Polovnikov en bibliographie), ce qui prouve encore une fois que les fonctions monstres ne sont pas seulement des lubies de mathématiciens désœuvrés.

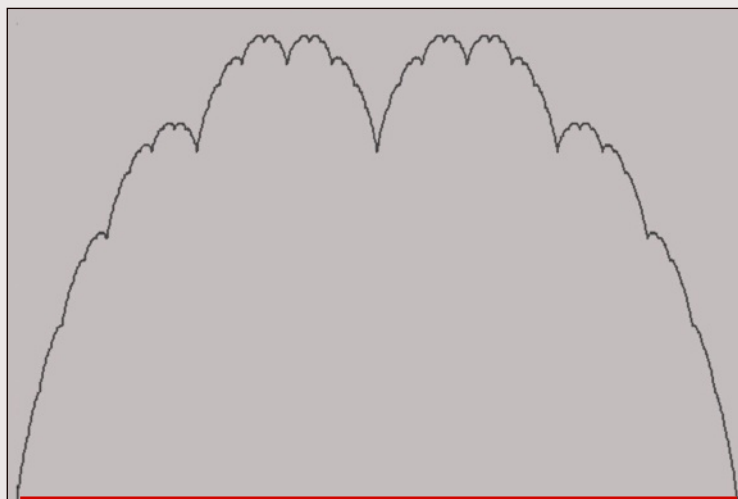
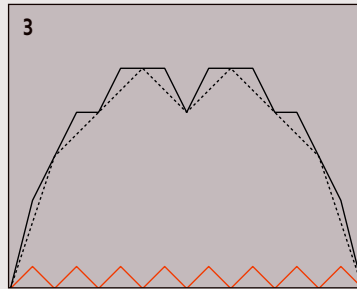
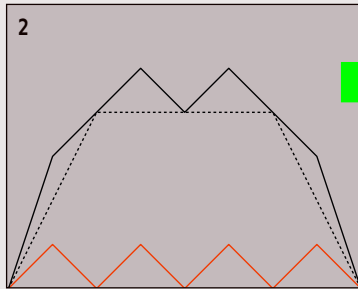
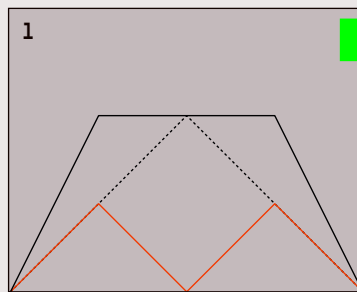
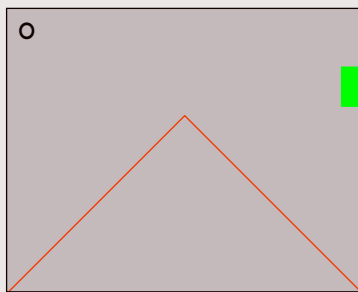
L'«escalier du diable» est définie comme une limite de fonctions continues. Cette limite est en même temps continue et différentiable sur l'intervalle

$[0, 1]$. Son étrange propriété est d'avoir une dérivée nulle sur tout l'intervalle $[0, 1]$ sauf aux points de l'ensemble triadique de Cantor (les six premières itérations de cet ensemble de Cantor sont représentées en a, qui est négligeable, ce qui veut dire qu'il peut être enfermé dans des intervalles dont la longueur cumulée est aussi petite que souhaité. Bien que de dérivée presque partout nulle,

la fonction de Cantor monte sans en avoir l'air de 0 à 1 (b).

Francesco De Santis, du laboratoire Cristal à l'université de Lille, a tiré de l'escalier du diable une belle sculpture. Il a considéré toutes les variantes qu'on obtient pour h en enlevant de manière répétée $x\%$ au lieu de un tiers) au centre des intervalles utilisés dans la construction de h . Les courbes obtenues ont été mises côte à côte, ce qui donne une surface, et donc la sculpture c. En coupant et en ouvrant la sculpture pour qu'on aperçoive bien la courbe pour un tiers, on a le résultat final d.





LA COURBE DU BLANC-MANGER

La fonction du blanc-manger du mathématicien japonais Kenji Takagi est un exemple

partout et dérivable nulle part. Elle est définie comme la limite de fonctions linéaires par morceaux, chacune somme de fonctions très simples (graphes ci-dessus, où la fonction représentée en rouge est additionnée à chaque étape). Le nombre de cassures (le nombre de points où il n'y a pas de tangente) des fonctions de la suite augmente à l'infini, la fonction à la suivante

À la limite, la fonction obtenue est toujours continue, mais n'a pas de tangente en aucun point.

Il existe d'autres suites de fonctions de ce type, dont celle proposée par Weierstrass, qui sont toutes continues et dérivables en tout point de $\mathbb{R}$, et dont la limite est une fonction continue mais nulle part dérivable. Inversement, on démontre que toute fonction continue dérivable sur $\mathbb{R}$ tout entier peut être définie comme la limite d'une suite de fonctions continues et nulle part dérivables.

> Les fonctions nulle part continues sont utiles, mais les fonctions continues partout le sont plus encore! On a le sentiment d'en avoir une bonne compréhension. Est-ce certain?

Avant d'aborder l'exemple de «l'escalier du diable», expliquons ce que signifie l'expression mathématique «presque partout». L'épaisseur ou la mesure d'un sous-ensemble E de $\mathbb{R}$ est sa longueur, ou la longueur cumulée de ses différentes composantes. Un intervalle a pour mesure sa longueur et une réunion d'intervalles disjoints a pour mesure la somme des longueurs des intervalles constitutifs. Dans les cas compliqués, on procède en enfermant E dans une liste d'intervalles dont on évalue la longueur totale en essayant de la rendre aussi petite que possible. Si l'on arrive à faire que cette longueur totale soit aussi proche de 0 que possible, on dit que E est «négligeable» ou de mesure nulle. Une propriété qui est vraie partout sauf sur un ensemble de mesure nulle est dite «vraie presque partout».

Un ensemble infini E est dénombrable si l'on peut numérotiser ses éléments: $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n, \dots$. Tout ensemble dénombrable est de mesure nulle car, en enfermant E dans les intervalles $[e_1 - 1/2^n, e_1 + 1/2^n], [e_2 - 1/4^n, e_2 + 1/4^n], \dots, [e_k - 1/2^k, e_k + 1/2^k], \dots$, la longueur totale des intervalles utilisés est $(1/n)[1 + 1/2 + 1/4 + \dots] = 2/n$, ce qui peut être rendu aussi petit qu'on le désire. Ce résultat du mathématicien français Émile Borel (1871-1956) montre que les nombres rationnels, bien que denses dans $\mathbb{R}$, forment quand même un ensemble négligeable!

L'ensemble triadique de Cantor, noté C , est ce qui reste quand, partant de l'intervalle $[0, 1]$, on en enlève le tiers médian, ce qui donne $[0, 1/3] \cup [2/3, 1]$, puis qu'on recommence à enlever les tiers médians des deux intervalles obtenus, ce qui donne quatre intervalles de longueur $1/9$ chacun, sur lesquels on recommence l'opération, et ainsi de suite. Cet ensemble C est de mesure nulle car la longueur totale est $2/3$ après une opération, $4/9$ après deux opérations, ..., $(2/3)^k$ après k opérations: la longueur totale tend vers 0 quand k tend vers l'infini. Cette mesure nulle signifie que le complémentaire de C dans l'intervalle $[0, 1]$ a pour mesure 1. En clair, l'ensemble C est négligeable et son complémentaire est l'intervalle $[0, 1]$ à très peu de choses près.

MONTÉE INSENSIBLE

La «fonction de Cantor» h que l'on va définir, et dont le graphe est surnommé «l'escalier du diable», est continue. Elle passe continûment de 0 à 1: $h(0) = 0, h(1) = 1$. Elle monte et pourtant elle a une dérivée nulle sur le complémentaire de l'ensemble C de Cantor, donc presque partout. Sur chacun des intervalles qu'on retire en construisant C , la fonction est constante. Cette fonction a été découverte

en 1885 par Ludwig Scheeffer, qui était un élève de Georg Cantor.

La définition la plus simple de h consiste à la considérer comme une limite de fonctions $h_1, h_2, h_3, \dots$. La fonction continue h_1 vaut 0 en 0, 1/2 sur le tiers médian de l'intervalle $[0, 1]$, et 1 en 1, et l'on rejoint ces éléments du graphe par des segments de droite (voir l'encadré 3). La fonction h_2 vaut 0, 1/4, 1/2, 3/4, 1 pour, respectivement, 0, les intervalles $[1/9, 2/9]$, $[1/3, 2/3]$, $[7/9, 8/9]$, et 1. Et ainsi de suite.

La fonction h est étrange. Elle est continue et presque partout constante (de dérivée nulle), c'est-à-dire partout sauf sur un ensemble négligeable. Et pourtant, elle réussit à monter de 0 à 1 : elle ne change de valeur «qu'en douceur» sur un ensemble de mesure nulle tout en restant continue !

Bien sûr, toutes sortes de variantes existent de cette fonction, qui par exemple sont continues et dérivables, presque partout de dérivée nulle et qui pourtant montent et descendent, voire passent par tous les points qu'on veut sans sont en nombre fini.

Notons que notre intuition que «si une fonction a une dérivée nulle presque partout, alors elle est constante» n'est pas entièrement fautive. On démontre en effet que si une fonction a une dérivée nulle sur un intervalle de $\mathbb{R}$, sauf pour des points d'un ensemble dénombrable, alors elle est constante. Dans le cas de la fonction h de Cantor, la dérivée est nulle sauf sur les points de l'ensemble de Cantor, lequel est certes de mesure nulle, mais est infini non dénombrable.

La fonction h permet d'éviter des erreurs, comme celle du Germano-Balte Axel Hahn qui, en 1882, avait cru démontrer que si une fonction a une dérivée nulle sur un intervalle à l'exception des points d'un ensemble de mesure nulle, alors elle est constante.

FONCTIONS CONTINUES PARTOUT MAIS DERIVABLES NULLE PART

Venons-en à la catégorie de monstres qui a le plus étonné les mathématiciens : les fonctions continues partout et dérivables nulle part.

Pour une fonction f , être dérivable en un point x signifie que quand y s'approche de x , le rapport $[f(x) - f(y)] / (x - y)$ tend vers une limite finie, la «dérivée en x ». Le concept est naturel : la dérivée (par rapport au temps) de la distance parcourue par un véhicule à l'instant t est sa vitesse à cet instant. Géométriquement, l'existence d'une dérivée en x de la fonction f signifie que le graphe de f a une tangente en x . S'il y a une cassure du graphe, comme c'est le cas en 0 pour la fonction valeur absolue $|x|$, alors la fonction n'est pas dérivable en ce point. L'idée que la continuité d'une fonction sur un intervalle oblige à être assez régulière est naturelle, et l'on peut donc croire que si une fonction est continue sur un intervalle, à l'exception de quelques points

(comme pour la fonction $|x|$), la fonction devrait y être dérivable.

Le 18 juillet 1872, le mathématicien allemand Karl Weierstrass présenta à l'Académie des sciences de Berlin un exemple de fonction continue sur $\mathbb{R}$ tout entier et qui n'est pourtant dérivable en aucun point. La fonction proposée résultait de manipulations habituelles sur les fonctions continues dérivables partout : il s'agit d'une somme infinie de telles fonctions. La formule de Weierstrass est :

$$f_{a,b}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x)$$

Si l'on prend pour coefficients a et b un nombre réel a tel que $0 < a < 1$ et un entier b tel que $ab > 1 + 3\pi/2$, on montre que $f_{a,b}$ est continue sur $\mathbb{R}$ mais n'est dérivable nulle part. Si l'on ne fait la somme que jusqu'à un entier k , on obtient une fonction continue et dérivable qui oscille de plus en plus vite quand k augmente ; cette oscillation, qui correspond à une vibration accélérée de la tangente au graphe, rend impossible l'existence de la tangente quand k tend vers l'infini.

Weierstrass ne fut pas le premier à trouver une telle fonction. Au moins deux mathématiciens l'avaient précédé. Le premier est le mathématicien tchèque Bernard Bolzano, qui trouva une telle fonction vers 1830 mais dont les textes sur le sujet ne furent redécouverts que bien plus tard et publiés en 1922. Indépendamment vers 1860, le mathématicien suisse Charles Cellérier trouva lui aussi une telle fonction publiée après sa mort en 1890 (pour des détails voir la belle et très complète thèse de Johanna Thim, disponible sur internet).

L'encadré 4 donne le dessin et l'idée d'une autre fonction avant les propriétés voulues mais plus facile à visualiser. Son graphe est nommé «courbe du blanc-manger» (car elle ressemble au dessert de même nom) ou «courbe de Takagi», d'après le mathématicien japonais Teiji Takagi qui l'a décrite en 1901.

La courbe de Weierstrass a été l'une des toutes premières courbes fractales étudiées. Pourtant, le calcul de la dimension de Hausdorff du graphe de la fonction de Weierstrass (qui mesure en quelque sorte son agitation) est resté très longtemps un problème ouvert. Conjecturé depuis plus de trente ans par Benoît Mandelbrot, le théorème qui indique que cette dimension est égale à $2 + \ln(a)/\ln(b)$ n'a été prouvé qu'en 2017 par le mathématicien allemand Gerhard Keller, et indépendamment par le mathématicien chinois Weixiao Shen.

Insistons sur le fait que ces courbes étranges font aujourd'hui encore l'objet de nombreuses recherches. On en découvre de nouvelles de la même catégorie et on les rend utiles en physique, ce qui prouve que ces «monstres mathématiques» sont à la fois d'une grande banalité et très utiles... ■

BIBLIOGRAPHIE

L'escalier du diable, <https://bit.ly/2QJLcNg>, consulté en juin 2020.

W. Shen, Hausdorff dimension of the graphs of the classical Weierstrass functions, *Mathematische Zeitschrift*, vol. 289, pp. 223-266, 2018.

S. Nechaev et K. Polovnikov, Rare event statistics and modular invariance, *Physics-Uspexhi*, vol. 61(1), pp. 99-104, 2018.

S. Nechaev, Non euclidean geometry in nature, dans *Order, Disorder and Criticality, Advanced Problems of Phase Transition Theory*, vol. 5 (ed. Yuri Holovatch), 2018 (<https://arxiv.org/pdf/1705.08013.pdf>).

K. Beanland et al., Fractalizations of Thomas's function and differentiability, *The American Mathematical Monthly*, vol. 116(6), pp. 531-535, 2009.

J. Thim, Continuous, nowhere differentiable functions, Master's thesis, Lulea University, 2013 (<https://bit.ly/2YWLEw>).

L'AUTEUR

LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint

VOIR LA CONFIANCE EN PEINTURE

L'analyse informatique de milliers de portraits peints en Europe montre que la confiance sociale ne cesse d'augmenter depuis le xv^e siècle.



Les visages de Thomas Cranmer (ci-dessus) et de sir Matthew Wood (à droite) montrent, lorsqu'ils sont analysés par un algorithme (dans les cartouches, les points colorés indiquent ceux pris en compte par le programme) aux côtés de près de 2 000 autres portraits, que la confiance sociale n'a cessé d'augmenter depuis la fin du Moyen Âge.

Il a l'air un peu tendu, voire méfiant, et à tout le moins préoccupé. C'est ce que Thomas Cranmer (1489-1535), représenté par Gerlach Flicke en 1545 (voir le tableau ci-contre), avait fort à faire. Archevêque de Canterbury, il eut à poser avec Thomas Cromwell les fondations de l'Église d'Angleterre sous le règne du tyrannique Henri VIII, désireux de voir annuler son mariage avec Catherine d'Aragon. Le monarque est célèbre notamment pour avoir fait exécuter deux de ses deux épouses. Ses successeurs n'étaient pas en reste: Cranmer sera brûlé sur ordre du catholique Marie I^{re}, dite Marie la sanglante (Bloody Mary).

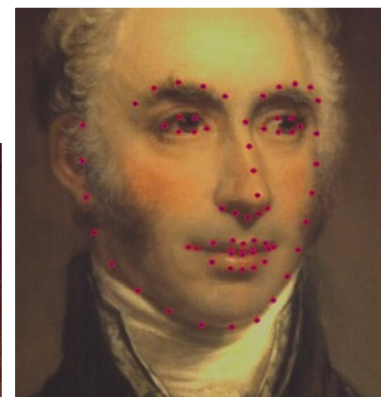
Près de trois siècles plus tard, sir Matthew Wood (1768-1842) sur le tableau d'Arthur William Devis peint vers 1815 (voir le tableau page ci-contre) semble plus assuré, plus affirmé, plus confiant et avec

son entourage, et il a de quoi afficher cette expression. Ce fils de tisserand fut tour à tour lord-maire de Londres, élu au parlement et enfin anobli.

Ces portraits qui prenaient des mois à être réalisés portent un message et relèvent d'une stratégie de communication du commanditaire. En un mot, ils sont le reflet d'une époque. Mais ces deux exemples sont-ils représentatifs d'une évolution à plus grande échelle d'un gain de confiance traversant l'histoire? C'est ce que semblent prouver les résultats de Nicolas Baumard, de l'institut Jean-Monod (ENS, EHESS, PSL) et de ses collègues de l'Inserm, de Sciences Po et du Cevipof. À travers l'étude d'environ 2 000 portraits d'Européens datés de 1505 à 2016 et conservés à la National Portrait Gallery, à Londres, ils ont montré qu'au fil des siècles, les expressions de confiance et de sympathie se faisaient plus nombreuses sur les visages représentés, alors que les

signes d'une certaine méfiance disparaissaient. La transition de Thomas Cranmer vers Sir Matthew Wood serait bien une tendance générale.

Comment s'y sont pris les scientifiques? Ils ont conçu un algorithme d'analyses d'images qui a appris à lire l'expression de visages selon par exemple le sourire ou la forme des sourcils. Ce programme d'apprentissage automatique a été «formé» à partir de quatre corpus d'images, des photographies, pour lesquelles le sentiment de confiance exprimé avait déjà été estimé par d'autres techniques. Lors de cette phase d'apprentissage, les biais relatifs à l'âge, au sexe, à



l'orientation du visage ont été pris en compte de façon à ce que l'algorithme reproduise au mieux le jugement humain.

L'analyse par le même algorithme de 4106 portraits de la Web Gallery of Art, couvrant 19 pays d'Europe occidentale entre 1360 et 1918, a conduit à des conclusions similaires. Comment expliquer l'essor des indices faciaux liés à la confiance sociale dans la peinture européenne? Selon les auteurs, on doit voir le témoignage d'une société de plus en plus apaisée, plus démocratique et de moins en moins marquée par la violence. Cette hypothèse a été testée sur la base de l'analyse de plus de 2000 selfies

publiés sur Instagram dans 6 villes (Bangkok, Berlin, Londres, Moscou, New York et São Paulo): l'algorithme a bien repéré sur les autoportraits les signes d'une confiance interpersonnelle et l'absence de coopération plus fortes dans les cités où des enquêtes, comme celle du projet international du World Values Survey, avaient déjà montré que ces sentiments étaient plus prononcés.

Cependant, le critère dont l'évolution corroborerait le mieux la tendance mise au jour serait l'accroissement du PIB par habitant. Les auteurs appellent à confirmer l'ensemble de ces résultats à partir d'autres sources. Eux-mêmes s'y emploient d'ores

et déjà en partant de textes littéraires et d'œuvres musicales. On saura alors si l'argent fait le bonheur, du moins celui qui transparaît sur les portraits. ■

L. Safra et al., Tracking historical changes in trustworthiness using machine learning in painting, *Nature Communications*, vol. 11, article 4728, 2020.



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

LES AUTEURS



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

DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE À PETITE ÉCHELLE

Sondes spatiales, sous-marins, porte-avions...:
l'exploitation de l'énergie nucléaire ne nécessite pas
forcément des installations industrielles de grande taille.

U n panache de vapeur d'eau au-dessus de gigantesques tours de refroidissement, les centrales plantées au cœur de grands sites industriels, telle est l'image qui nous vient en général lorsqu'on évoque l'énergie nucléaire. Pourtant, une telle énergie est produite à travers des dispositifs de tailles variées et fournit déjà bien plus que l'électricité du réseau. Elle alimente en effet des sondes spatiales, des sous-marins, des porte-avions... Et depuis quelques années, des ingénieurs s'attachent au développement de petites centrales nucléaires modulaires de moyenne puissance. C'est l'occasion de découvrir quelques-uns des mécanismes physiques à l'œuvre dans ces systèmes.

La célèbre relation d'Einstein $E=mc^2$ montre que l'on peut convertir la

masse en énergie, et réciproquement. Cette relation est valable en toutes circonstances. Dans les réactions chimiques, les énergies en jeu étant de l'ordre de 100 kilojoules par mole de matière, la variation de masse est de l'ordre du microgramme, ce qui est négligeable.

DES DÉSINTÉGRATIONS OU CHAUFFEMENT

Tel n'est pas le cas des réactions nucléaires, où l'énergie libérée par les désintégrations des noyaux atomiques atteint des dizaines de milliers de gigajoules (l'équivalent de quelques dizaines de grammes) par mole. Cette énergie se retrouve *in fine* sous forme de chaleur, qu'un dispositif adéquat peut convertir en énergie utile.

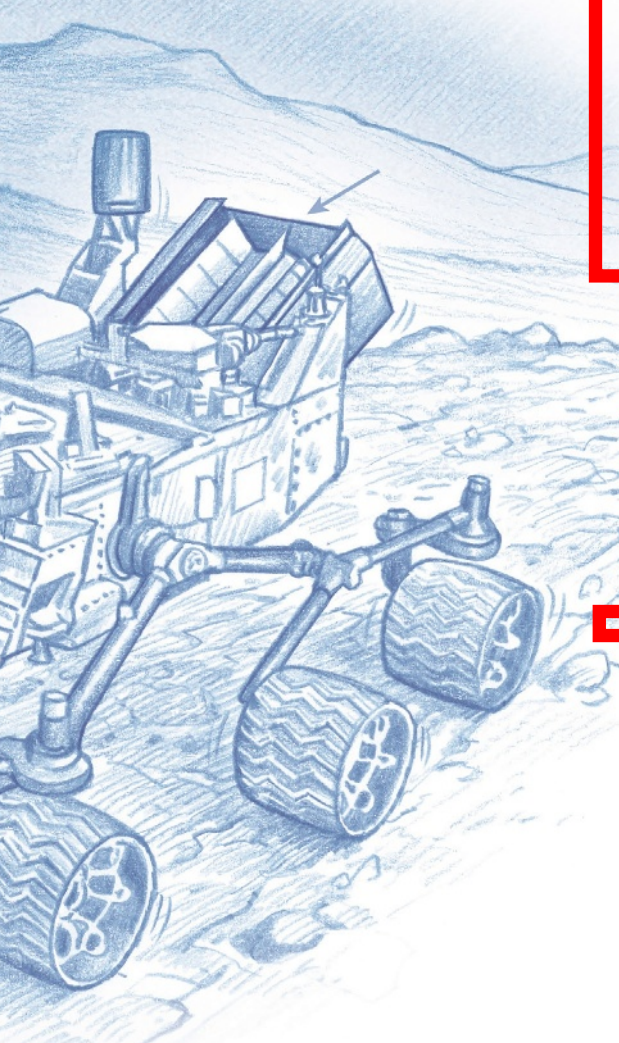
Parmi les dispositifs les plus simples, on trouve les générateurs thermiques à

Le rover *Curiosity*, de la Nasa, explore le sol de Mars grâce à de l'énergie nucléaire. Il porte à l'intérieur (même) un générateur thermique à radio-isotopes (GTR), dispositif qui mesure une soixantaine de centimètres.

radio-isotopes, en abrégé GTR, ou des thermopiles assurent la conversion en électricité. C'est ce type de générateur qui alimente en énergie les sondes spatiales comme *Cassini* ou *New Horizons* voyageant aux confins du Système solaire: des panneaux photovoltaïques seraient inefficaces, en raison de la diminution du flux solaire à mesure que l'on s'éloigne de l'astre du jour.

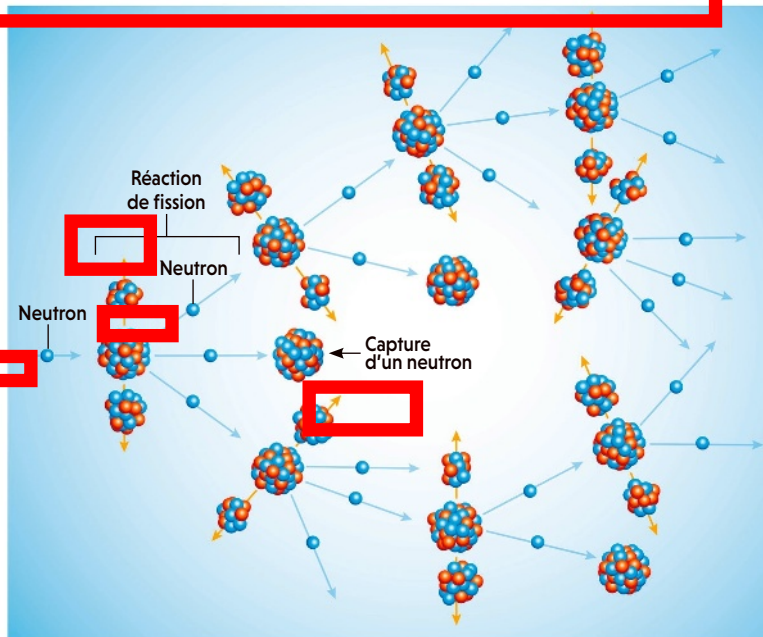
Les GTR équipent aussi les rovers martiens tels que *Curiosity* ou *Perseverance*, embarqué sur la mission *Mars 2020*, et y prennent une place non négligeable: ils se présentent sous la forme d'un cylindre de 64 centimètres





RÉACTIONS DE FISSION EN CHAÎNE

Lorsqu'un noyau d'uranium 235 est heurté par un neutron, il se désintègre et peut fissionner en deux noyaux plus petits en émettant généralement deux ou trois neutrons (parfois, il peut aussi absorber le neutron incident, sans fissionner). Chacun de ces neutrons secondaires peut entrer à son tour en collision avec un autre noyau d'uranium 235, qui se désintègre à son tour en émettant des neutrons, et ainsi de suite. Ces réactions en chaîne se multiplient exponentiellement si l'élément fissile (l'uranium 235) est assez abondant et concentré, ce qui peut conduire à un échauffement excessif. Les réacteurs nucléaires sont des dispositifs qui contrôlent le taux de réactions en chaîne ; l'énergie libérée par ces réactions se transforme en chaleur, qu'exploite un générateur d'électricité.



de diamètre sur 66 de haut, pour une masse de 45 kilogrammes, dont 4,8 kilogrammes d'oxyde de plutonium 228 (voir l'illustration ci-dessus). La désintégration naturelle de cet isotope produit en début de mission une puissance thermique de 2 kilowatts, qui décroît ensuite lentement, sur des dizaines d'années; de quoi effectuer des explorations prolongées, même si les thermopiles ont un faible rendement et ne fournissent que 120 watts de puissance électrique.

L'avantage de ce type de générateur est l'absence totale de pièces mobiles: aucun risque d'usure, des parties réduites et pas de vibrations susceptibles de perturber les instruments de mesure. Leur utilisation reste toutefois réservée à des situations exceptionnelles, où le risque de dispersion de matière radioactive est faible.

Pour des applications terrestres, on ne peut se contenter de la radioactivité naturelle et de la désintégration spontanée d'atomes radioactifs. C'est pourquoi on construit des réacteurs, qui permettent d'augmenter et de contrôler le rythme des désintégrations en maintenant des réactions en chaîne (voir l'illustration ci-dessus).

FAVORISER LES RÉACTIONS DE FISSION, MAIS PAS TROP

Ainsi, les réacteurs à eau, les plus courants, utilisent de l'uranium 235, dont le noyau atomique devient instable s'il absorbe un neutron. Il se scinde alors en deux noyaux plus petits et émet généralement lors de cette fission deux ou trois neutrons (2,4 en moyenne). Si tous les neutrons émis provoquent eux-mêmes une réaction de fission, on aurait

une réaction en chaîne avec une augmentation exponentielle du nombre de réactions. Cet emballement est bien sûr à éviter; aussi les réacteurs nucléaires sont-ils conçus pour que chaque fission en provoque, en fin de compte, une autre exactement (un peu plus au moment du démarrage).

À cette fin, on peut jouer sur divers paramètres. Tout d'abord, la concentration en uranium 235: plus celle-ci est importante, plus il est facile de provoquer une réaction en chaîne, car on augmente la probabilité de capture des neutrons. >

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

> On peut aussi jouer sur la taille du réacteur. Plus celui-ci est petit, plus les neutrons quitteront la zone active avant d'avoir provoqué une nouvelle fission. C'est l'un des rares aspects défavorables à la miniaturisation!

Enfin, on peut aussi ralentir les neutrons rapides émis par les fissions, ce qui a pour effet d'augmenter leur probabilité d'être réabsorbés. D'où l'utilisation d'un modérateur, c'est-à-dire d'un élément qui ralentit les neutrons sans les absorber. C'est le cas de l'hydrogène de l'eau.

Afin de contrôler activement le taux de réactions dans un réacteur, on utilise en sus des barres absorbantes (de neutrons) que l'on peut plonger plus ou moins dans le cœur du réacteur, là où le matériau fissile est placé. Ces «barres de contrôle» sont en général verticales, de façon qu'elles tombent naturellement sous l'effet de leur poids en cas d'urgence: elles interrompent alors totalement la réaction en chaîne. En les soulevant, on augmente le nombre de fissions, donc la température au sein du réacteur. La chaleur est alors évacuée grâce à un fluide caloporteur et le reste ressemble peu ou prou à des centrales thermiques classiques.

PUISSANCE RÉDUITE. TAILLE RÉDUITE.

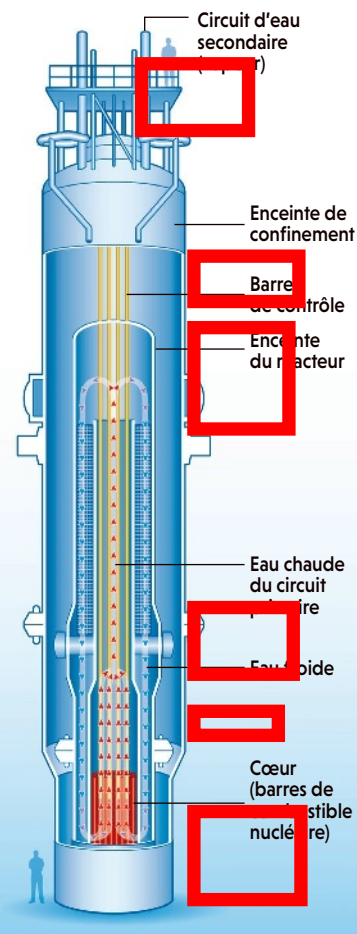
On remarquera que, dans tout ce qui précède, la taille du réacteur n'est pas déterminante dans le fonctionnement. Cependant, comme on a développé les centrales nucléaires afin de produire massivement de l'énergie, leurs réacteurs avaient les tailles requises pour des puissances de l'ordre du gigawatt. Ce gigantisme n'est pas nécessaire si la puissance visée est plus modeste. Ainsi, les réacteurs nucléaires utilisés dans les sous-marins de classe *Le Triomphant* ou le porte-avions *Charles de Gaulle* n'occupent que quelques dizaines de mètres cubes, pour une puissance thermique de 150 mégawatts.

Ce type de réalisations a suscité ces dernières années le développement de projets de petits réacteurs d'une puissance thermique avoisinant la centaine de mégawatts. L'une des principales motivations est que ces réacteurs sont transportables et modulaires.

Celui que conçoit la compagnie américaine NuScale aura ainsi une charge de combustible nucléaire 20 fois plus faible qu'un réacteur nucléaire classique, pour une puissance thermique atteignant 200 mégawatts (ce qui donne environ 60 mégawatts électriques) avec deux ans d'autonomie. Il tient dans un cylindre de

UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE COMPACT

La société américaine NuScale développe un réacteur nucléaire qui tient dans un cylindre haut de quelque 23 mètres et de moins de 3 mètres de diamètre. Il produira 60 mégawatts d'électricité, à peu près 15 fois moins qu'un réacteur nucléaire classique. La chaleur dégagée par les réactions de fission du matériau nucléaire (barres de combustible, en bas) chauffe l'eau d'un circuit fermé. L'eau chaude, moins dense, monte et cède sa chaleur à un second circuit (en haut) qui va produire de la vapeur et faire tourner une turbine (non représentée); refroidie, l'eau redescend, se réchauffe en bas, et ainsi de suite. Des barres de contrôle, qui absorbent les neutrons, sont insérées plus ou moins profondément parmi les barres de combustible pour réguler le taux de réactions de fission.



23 mètres de haut et de 2,8 mètres de diamètre qui englobe le cœur, le circuit caloporteur et le générateur de vapeur (voir l'encadré ci-dessus).

La compacité du dispositif réduit considérablement les longueurs de tuyauterie nécessaires et permet d'avoir des dispositifs de sécurité entièrement passifs. Par exemple, la circulation de l'eau du circuit primaire ne nécessite aucune pompe et s'effectue naturellement par effet de thermosiphon (dû à la différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide). Il n'y a donc pas besoin d'un générateur diesel de secours en cas d'incident pour faire fonctionner les pompes. D'un poids de 700 tonnes, le réacteur de NuScale peut être transporté en trois segments par camion ou barge. Cette approche permet d'industrialiser toutes les étapes de fabrication, chargement et déchargement et démantèlement. Les étapes sensibles sont ainsi réalisées dans une usine dédiée et non plus là où l'électricité est produite.

Cette approche règle ainsi un certain nombre de problèmes inhérents à la fabrication, au fonctionnement et au démantèlement des centrales nucléaires classiques. C'est toutefois au prix d'autres inconvénients, notamment les risques de dissémination si les sites d'implantation de ces réacteurs se multiplient trop.

BIBLIOGRAPHIE

Multi-mission

Thermoelectric generator (MMRTG), document de la Nasa, 2021 : <https://go.nasa.gov/3jj99RB>

J. Doyle et al., Highly reliable nuclear power for mission-critical applications, Proceedings of ICAPP 2016, San Francisco, 2016.

Les monographies du nucléaire, documents du CEA : <https://bit.ly/2S77xNJ>

Covid-19, réflexions sur une pandémie

tables rondes - carte blanche

novembre 2020 — janvier 2021

© Gettyimages

cité

sciences
et industrie

La crise sanitaire du coronavirus 2019 a touché l'ensemble de la planète et a bouleversé l'organisation de nos sociétés. Elle a ébranlé la médecine et la recherche, les populations vulnérables, le lien social, les conditions de travail, les modes de consommation et la communication. Face au risque, les attitudes des gouvernements et des individus étaient différenciées en fonction de la gestion de la crise, des systèmes de soin et des conditions socio-économiques. La réflexion s'impose pour répondre aux nombreuses questions soulevées par cette pandémie. À quels enjeux éthiques sommes-nous confrontés? D'où vient le virus et comment s'est-il répandu? De quelle façon la recherche s'est-elle mobilisée? Comment analyser la gestion de la crise sanitaire à l'échelle mondiale? Pourquoi la désinformation sur la Covid-19 est-elle devenue virale? Quelles leçons tirer de cette situation inédite pour imaginer le monde d'après et agir?

du 10 novembre à 10h30

Réflexions éthiques et sociétales pour temps de pandémie

Anne Caron-Dégli, magistrat, avocate générale à la Cour de cassation; **Régine Benveniste**, psychiatre, membre du Comité des Morts de la Rue; **Fabrice Gzil**, philosophe, responsable des réseaux, Espace de réflexion éthique de la région Île-de-France; **Patrick Lagadec**, directeur de recherche honoraire à l'École polytechnique; **Didier Sicard**, président d'honneur du Comité consultatif national d'éthique.

Modération: Emmanuel Hirsch, professeur d'éthique médicale, Université Paris-Saclay, directeur de l'Espace de réflexion éthique de la région Île-de-France.

> Les mardis 5, 12, 19 et 26 janvier, à 19h

Covid-19, quels enseignements pour l'avenir?

Le 5 janvier

De l'émergence du virus à la pandémie

Barbara Dufour, vétérinaire, professeur de maladies infectieuses et d'épidémiologie à l'École vétérinaire d'Alfort; **Frédéric Kock**, anthropologue, directeur de recherche CNRS, Laboratoire d'anthropologie sociale; **Serge Morand**, écologue, directeur de recherche au CNRS, à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier, chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad).

■ 12 janvier

La recherche sur le virus: alliance ou concurrence?

Dominique Costagliola, épidémiologiste, directrice de recherche Inserm, membre de l'Académie des sciences, directrice adjointe de l'Institut Pierre-Louis d'épidémiologie et de santé publique (IPLESP), Sorbonne Université; **Léo Coutellec**, maître de conférences en épistémologie et en éthique des sciences; **Izabela Jelovac**, économiste, directrice de recherche CNRS au Groupe d'analyse et de théorie économique Lyon-St Étienne.

■ 19 janvier

Face à la crise sanitaire: des stratégies contrastées

Olivier Borraz, sociologue, directeur de recherche CNRS, directeur du Centre de sociologie des organisations Sciences Po-CNRS; **William Dab**, épidémiologiste, professeur émérite d'hygiène et sécurité du Cnam, ancien directeur général de la Santé; **Jocelyn Raude**, psychologue social, maître de conférences à l'École des hautes études en santé publique (EHESP), chercheur à l'Unité des virus émergents.

■ 26 janvier

Covid-19, nos sociétés démasquées

Mireille Delmas-Marty, juriste, professeure honoraire au Collège de France et membre de l'Académie des sciences morales et politiques; **Didier Fassin**, sociologue, titulaire de la chaire santé publique au Collège de France (intervention en visio-conférence); **Barbara Stiegler**, philosophe, professeure à l'université Bordeaux-Montaigne (sous réserve).

■ 28 janvier à 19h

Carte blanche à Mathias Girel

Covid-19: de la rumeur à la désinformation

Devant l'urgence médicale, des scientifiques, des responsables politiques et des journalistes seraient-ils passés par-dessus les règles d'une science intégrée? L'espace médiatique et surtout les réseaux sociaux ont été envahis par les rumeurs, les soupçons et les manipulations au risque d'amplifier la crise causée par la Covid-19. Qu'est-ce qui a nourri et entretenu ces mystifications? En quoi les épidémies se prêtent-elles si bien aux infos? Pourquoi et comment en est-on arrivé à parler d'« infodémie »?

Mathias Girel, maître de conférences au département de philosophie à l'ENS, s'entoure de personnalités de son choix pour échanger sur un sujet qui lui tient à cœur.

L'AUTEUR



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

CE QUE LA PHYLOGÉNIE RACONTE DES ÉPIDÉMIES

Si l'histoire et l'épidémiologie retracent les épidémies du point de vue humain, la phylogénie prend celui des microorganismes... et apporte parfois des réponses inattendues.

Depuis que le SARS-CoV-2, le coronavirus responsable de la pandémie Covid-19, a été séquencé, en janvier 2020, nombre d'équipes tentent de reconstituer son histoire. Et s'il est délicat de déterminer le circuit qu'il a suivi parmi les humains tant les différentes sources humaines du virus se ressemblent, son origine évolutive se précise déjà. Les reconstructions de l'arbre des sarbecovirus, le sous-genre de coronavirus qui inclut le SARS-CoV-2, semblent converger vers l'idée que le virus humain proviendrait de chauves-souris et que la lignée dont il est issu aurait circulé pendant des dizaines d'années chez ces animaux avant de débarquer chez l'humain, tandis que le pangolin n'aurait été qu'un intermédiaire de transmission entre la chauve-souris et l'humain.

De fait, aujourd'hui, grâce au séquençage à haut débit, la phylogénie moléculaire – l'étude des arbres de parenté des espèces par comparaison de leurs génomes – est devenue un outil incontournable pour

comprendre les épidémies du point de vue de leurs agents pathogènes. Elle offre même la possibilité de reconstituer l'histoire d'épidémies qui, jusque-là, avaient gardé leur part de mystère, soit parce qu'elles sont très anciennes, soit parce que, bien que récentes, elles présentent d'étranges caractéristiques. C'est ainsi que, tout récemment, deux énigmes très différentes ont été résolues, l'une concernant la peste de Justinien et l'autre, la maladie de la langue bleue, une épizootie qui a atteint le bétail européen à deux reprises dans les années 2000.

Les historiens distinguent trois grandes pandémies de peste. La peste de Justinien, du VI^e au VIII^e siècle, la « mort noire » du XIV^e au XVIII^e siècle et la toute récente pandémie des XIX^e et XX^e siècles. C'est au cours de cette dernière, en 1894 à Hong Kong, que le pasteurien Alexandre Yersin a découvert le bacille de la peste, nommé en son honneur *Yersinia pestis*. S'il ne fait aucun doute que cette bactérie est bien la cause de la mort noire, c'est beaucoup moins clair concernant la peste de Justinien. Était-ce une peste au sens de la médecine moderne

La peste existait peut-être 1 500 ans avant notre ère : le papyrus Ebers, remontant à cette époque, décrit une maladie qui y ressemble, et l'archéozoologie montre que le rat du Nil (*Arvicanthis niloticus*) et la puce *Xenopsylla cheopis* étaient présents et pouvaient servir de réservoir de l'agent pathogène.



Sur cette image de microscopie électronique à balayage, une multitude de bactéries (*en jaune*) ont colonisé les épines qui tapissent la partie antérieure du système digestif de la puce, le proventricule (*en rose*).



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**Biodiversité, le pari
de l'espoir,**
(Le Pommier, 2020).

En se développant dans le tube digestif de la puce, la bactérie *Yersinia pestis* bloque celui-ci, ce qui affame la puce et l'incite à rechercher de nouveaux hôtes (rats, humains et autres mammifères), à qui elle transmet le bacille durant son repas de sang.

EN CHIFFRES

250 000

On estime par modélisation que la peste de Justinien a fait entre 250 000 et 16 000 morts

et les deux tiers de la population, avec un maximum de 19 000 morts par jour (l'historien byzantin Procope de Césarée évoque 10 000 morts par jour).

25 MILLIONS

La mort noire a décimé de 30 à 50 % de la population en Europe en 5 ans (2547-2552), soit environ 25 millions de personnes. Au total, elle a provoqué plus de 50 millions de morts en Europe.

3 248

De 2010 à 2015, on a enregistré 3 248 cas de peste dans le monde, dont 504 mortels, principalement à Madagascar, en République démocratique du Congo et au Sénégal, selon l'Organisation mondiale de la santé.



Si les rats sont les principaux réservoirs de la bactérie *Yersinia pestis*, l'agent de la peste, la puce de rat *Xenopsylla cheopis* est le principal vecteur de la maladie.

ou une autre maladie lui ressemblant ? Les données historiques de l'époque ne permettent pas de trancher. Or la biologie moderne dispose des outils indispensables à une telle enquête. Aussi, depuis une dizaine d'années, différents laboratoires se sont penchés sur ce problème.

À LA RECHERCHE DE L'ADN ANCIEN

La peste de Justinien s'est déclarée en Éthiopie et en Égypte en 541. L'année suivante, durant le règne de l'empereur Justinien le Grand, elle a atteint Constantinople, puis la frontière franco-germanique en 543. Selon Grégoire de Tours, Arles a été touchée en 549, puis

Clermont-Ferrand en 567. Ainsi, de nombreux morts de cette maladie reposent dans les cimetières européens. Il fallait donc trouver des dépouilles contemporaines de cette peste et y rechercher des traces d'ADN de l'agent pathogène.

En 2013, l'équipe de Holger Scholz, de l'Institut de microbiologie de l'armée fédérale allemande, a publié les résultats d'un tel travail. Les chercheurs ont supposé que les nombreuses victimes de cette peste avaient été enterrées ensemble. Ils ont ainsi étudié 19 squelettes provenant de 12 tombes multiples dans un ancien cimetière d'Aschheim, non loin de Munich. Partant de dents prélevées, ils ont recherché l'ADN de *Yersinia pestis*. Les conclusions sont indiscutables : *Yersinia pestis* est bel et bien l'agent de la peste de Justinien. De plus, les données génomiques obtenues étaient suffisantes pour que les chercheurs les incluent dans une phylogénie moléculaire avec des souches actuelles du bacille. L'arbre obtenu indique que la peste de Justinien provenait d'Asie.

Restait à préciser ces résultats préliminaires. L'équipe de Holger Scholz s'est alliée à celle de Hendrik Poinar, de l'université McMaster, au Canada. En 2014, à partir des dents de deux individus trouvés dans le cimetière d'Aschheim, les chercheurs ont réussi à reconstruire le génome



Yersinia pestis
Longueur: 1 à 3 µm



Xenopsylla cheopis
Longueur: 1,5 à 4 mm

> de chacune des deux souches qui les ont infectés. Ils ont alors inclus ces deux génomes dans une imposante base de données rassemblant 131 génomes de souches actuelles et des 2^e et 3^e pandémies, issues du monde entier (surtout l'Europe, le Moyen et l'Extrême Orient). La phylogénie résultante est d'une grande précision. Les deux génomes sont proches et leur branche commune s'enracine entre deux branches asiatiques, loin des souches responsables des 2^e et 3^e pandémies. En d'autres termes, la peste de Justinien et la mort noire sont deux épidémies indépendantes, signe que la maladie a émergé plusieurs fois chez les humains.

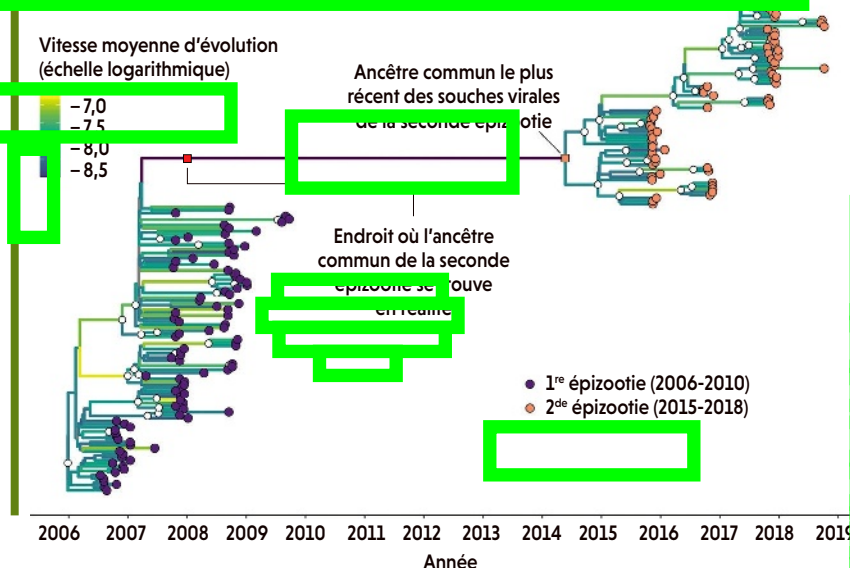
Récemment, une autre équipe allemande autour de Marcel Keller, de l'institut Max-Planck à Jena, a encore étoffé les données. Cette fois, ce sont 21 sites microbiologiques distribués en Europe (Allemagne, Autriche, Grande-Bretagne, France, Espagne) qui ont permis la reconstruction de huit génomes du bacille. Ces derniers présentent de légères différences, mais se rassemblent en un seul groupe qui prend place entre les groupes chinois, la souche la plus proche étant originaire du Kirghizistan et du Xingjiang. Les chercheurs avancent le scénario suivant : *Y. pestis* est originaire de cette région de l'Asie et serait arrivée en Europe soit par l'Iran soit par l'Inde, via la mer Rouge. L'enquête se poursuit, mais, selon eux, l'arrivée par l'Inde serait la plus probable en raison de la proximité des souches indiennes et du groupe de huit génomes. D'autant que les relations entre l'Inde et l'Europe se faisaient par la navigation via l'Océan Indien et la mer Rouge...

HIBERNATUS

L'énigme posée par la maladie de la langue bleue était tout autre. D'origine africaine, cette maladie due à un arbovirus transmis par des moucheron piqueurs (genre *Culicoides*) a atteint épisodiquement l'Europe après la Seconde Guerre mondiale. C'est ainsi qu'en 2006, une épidémie a pris naissance aux Pays-Bas avec un nouveau variant du virus (nommé BTV-8), puis a atteint la Belgique, l'Allemagne, le Luxembourg et la France. Un important travail de médecine vétérinaire a entraîné une éradication de la maladie, après la disparition, en 2010, du dernier foyer en Italie du Nord. Mais en 2015, un nouveau foyer est soudain apparu dans l'Allier et l'épidémie s'est étendue en France jusqu'à atteindre en 2018 l'Allemagne et la Suisse. Comment expliquer cette reprise ?

UNE ÉVOLUTION GELÉE

Le virus responsable de la maladie de la langue bleue se diversifie rapidement, mais, suite à une épidémie, se maintient en première approximation. Pourtant, la phylogénie des épidémies de 2006 et 2015 montre que le virus s'est maintenu à évoluer entre les deux. En fait, des chercheurs ont moussé une nouvelle phylogénie avec les mêmes données, mais en laissant le virus évoluer pendant ces années. C'est l'arbre ci-dessous, dont l'échelle des temps montre la conservation.



On a pensé que le virus avait circulé à bas bruit. Cette maladie étant à déclaration obligatoire, certains éleveurs avaient peut-être omis de la signaler. Mais une analyse moléculaire du virus vient de donner une tout autre explication. En effet, une équipe internationale autour de Massimo Palmarini et Roman Biek, de l'université de Glasgow, au Royaume-Uni, a réalisé une phylogénie de 164 génomes de la souche BTV-8 provenant des deux épidémies. Résultat : la phylogénie présente évidemment deux blocs, suivant les deux épidémies. Mais tout se passe comme si le virus n'avait pas évolué entre les années 2010 et 2015 (voir l'encadré ci-dessus) ! Une seule explication : le virus a été congelé, puis décongelé... Cet accident est sans doute intervenu durant des décongelations de la semence infectée de taureaux lors d'inséminations artificielles.

Il est à parier que la phylogénie moléculaire révélera encore bien d'autres histoires du vivant, qu'il s'agisse de l'épidémie de mai-juin 2018 due au virus Ebola en République démocratique du Congo, qui semble aussi due à une souche ayant moins muté que les autres, ou de celle du SARS-CoV-2 humain... ■

BIBLIOGRAPHIE

- D. J. Pascall et al., « *Yersinia pestis* and the plague of Justinian 541-542 AD : a genomic analysis », *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 14, pp. 319-326, 2014.
- M. Keller et al., « Ancient *Yersinia pestis* genomes from across western Europe reveal early diversification during the first pandemic (541-700) », *PNAS*, vol. 118(25), pp. 12 363-12 372, 2019.
- D. M. Wagner et al., « *Yersinia pestis* and the plague of Justinian 541-542 AD : a genomic analysis », *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 14, pp. 319-326, 2014.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

7 dossiers rédigés par des chercheurs
et des experts sur le sujet

Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



Commandez et téléchargez
les numéros en pdf



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



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

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
membre de l'Académie
internationale
de gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

DU BLEU MÉTALLIQUE EN CUISINE

Des couches bien organisées confèrent aux fruits

du laurier-tin leur coloration particulière, que l'on peut tenter d'imiter dans certaines préparations.

Les cercles culinaires prétendent parfois que le bleu est absent des ingrédients alimentaires « naturels », mais c'est oublier la myrtille, la betterave ou des choux dans des conditions d'acidité appropriées, des végétaux tels que certains maïs, haricots, pommes de terre, champignons... Pour les couleurs artificielles, depuis la disparition du bleu de méthylène des étagères des pâtisseries, il y a le bleu brillant, qui est le sel synthétique d'un acide ou l'indigotine, une version synthétique du colorant de nos pap

Comment rassurer nos concitoyens qui se privent d'un excellent curaçao pour éviter les colorants synthétiques ? Silvia Vignolini, de l'université de Cambridge et ses collègues ont trouvé une solution en analysant la couleur bleue métallique des fruits du laurier-tin, *Viburnum tinus* (*Current Biology*, vol. 30, pp. 1-7, 2020). La question initiale était de comprendre l'intérêt biologique des fruits bleus. Les végétaux ont coévolué avec les animaux et profité de ces derniers pour disperser leurs graines, en « échange » de nutriments. D'où les vives couleurs des fleurs et des fruits. Les fruits bleus du laurier-tin, notamment, nourrissent les oiseaux pendant l'hiver, et l'on s'interrogeait sur le rôle écologique de cette coloration.

Par le passé, on avait extrait des couleurs des fruits et fleurs des composés phénoliques qui les colorent, à côté des caroténoïdes (pour du jaune au rouge), des chlorophylles et leurs dérivés (vert à bleu). Les fruits du laurier-tin devaient-ils leur couleur à de tels composés, comme pour certaines pommes de terre, maïs, haricots, etc. ? Pourquoi pas, mais alors d'où vient l'apparence métallique ? Le fait que la lumière polarisée garde sa polarisation après s'être réfléchi sur les fruits montrait que la coloration était davantage due à la structuration et ses effets optiques qu'à des pigments. Certes, on avait trouvé

Le bleu métallique des fruits du laurier-tin n'est pas dû à un pigment, mais à des structures microscopiques multicouches.



un pigment rouge sombre dans les fruits, mais il se trouvait sous la couche responsable de la couleur bleue.

Les chercheurs ont alors effectué des études histologiques pour caractériser les nanostructures qui, comme pour les ailes de certains papillons bleus, pouvaient être responsables de la couleur. Ils ont identifié un ensemble multicouche de 10 à 30 micromètres d'épaisseur sous la surface du fruit. Les couches elles-mêmes ont une épaisseur comprise entre 30 et 200 nanomètres, et sont composées de petites vésicules dont l'indice de réfraction diffère de celui de la matrice où elles sont plongées. Tout cela avec des composés bien ordinaires pour des végétaux : la matrice est faite de cellulose, hémicelluloses et pectines, comme on en trouve dans toutes les parois cellulaires, et les vésicules sont des lipides. Et comme les biologistes s'intéressaient aux relations entre oiseaux et plantes, ils ont voulu savoir si ces lipides étaient des cires digestes ou des lipides nutritifs : la seconde hypothèse était la bonne.

Silvia Vignolini et ses collègues ont aussi produit un modèle informatique de la structure histologique des fruits du laurier-tin et exploré les propriétés optiques qui en découlent. Ils ont ainsi confirmé que ces structures sont bien à l'origine du bleu métallique. Et les chercheurs ont conclu que les oiseaux ne sont pas

leurrés par les fruits ainsi colorés, puisqu'en les consommant ils absorbent leurs lipides nutritifs. ■

LA RECETTE

COCKTAIL À PLUSIEURS COUCHES BLEUES

Les couches minces de nanostructures, mais une mousse émulsionnée donne ces reflets métalliques que présentent les fruits du laurier-tin. La saveur basique du bicarbonate de sodium utilisé ici pour faire du bleu est combattue par des acides qui viendront contrer le bicarbonate au moment de la dégustation.

- 1 En fond de verre, déposer une couche rouge sombre, comme l'assise des structures superficielles des fruits du laurier-tin, à l'aide de jus de cerise et de gélatine.
- 2 Quand cette couche de gel est prise, déposer une couche du liquide d'un beau bleu turquoise obtenu en broyant du curaçao rouge avec du bicarbonate de sodium et en filtrant.
- 3 À la surface de ce liquide, couler une mince couche de chocolat blanc, afin de l'isoler de la couche supérieure.
- 4 Sur le chocolat blanc, déposer du jus de citron additionné de curaçao.
- 5 Par-dessus, déposer une mousse émulsionnée obtenue à partir de curaçao dilué, additionné d'un blanc d'œuf battu en neige, puis émulsionné avec de l'huile d'olive.
- 6 Parsemer la couche supérieure de myrtilles.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !



N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516



N° 515 (sept. 20)
réf. PL515



N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505

À retourner accompagné de votre règlement à :

Next2C - Service abonnements Pour La Science - 26 BD Président Wilson CS 40032 - 67085 Strasbourg CEDEX - email : pourlascience@abopress.fr

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

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

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

TOTAL À PAYER _____

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 - Sarl au capital de 32000 € - RCS Paris 539 533 - Siret: 539 533 000 23 - APE 5814

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Elles sont également utilisées pour l'analyse de nos performances et pour la diffusion de nos offres. Vous pouvez à tout moment nous faire part de vos remarques et suggestions. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Téléphone : _____

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P. 22

10 000

Dans chaque cellule de notre corps, l'ADN se repère et forme quelque 10 000 boucles. Celles-ci interviennent dans la régulation de l'activité des gènes.

P. 22

« De nouveaux formats de communication adaptés aux publics volatils doivent être trouvés et perfectionnés, dans l'idée d'articuler astucieusement recherches, pédagogie et récits de vie »

VIRGINIE JOURNAL
politologue au Cevipof

P. 88

4,8 KG

Le premier Curiosity est vraiment grâce à un générateur thermique à radio-isotopes qui tient dans un cylindre de 64 centimètres de diamètre et 66 de hauteur. Il contient 4,8 kilogrammes d'oxyde de plutonium 238.

P.

FONCTION POP-CORN

La fonction pop-corn $g(x)$ vaut 1 si x est rationnel et $1/q$ si x est un nombre rationnel p/q avec p et q entiers sans diviseur commun. Comme du pop-corn, cette fonction saute sans cesse de valeurs positives en valeurs nulles. Elle est liée au « verger d'Euclide », un plan où serait planté un arbre en tout point (p, q) . En projetant le verger sur un certain plan, on retrouve la fonction pop-corn...

P. 92

PAPYRUS EBERS

Ce document égyptien date de 1500 avant notre ère. Il décrit une maladie qui ressemble à la peste. On le fait du Nil et la puce *Xenopsylla cheopis*, potentiels réservoirs du bacille de la peste, étaient également présents dans la région.

P. 2

2,8 %

L'eau douce ne représente que 2,8 % de l'eau terrestre. Les glaciers en stockent près de 70%. Le reste se répartit dans les nappes phréatiques, le pergélisol, en surface et dans l'atmosphère. Finalement, moins de 1% de l'eau terrestre est à la fois douce et liquide. Le lac Baïkal en est le principal réservoir à la surface de la planète.



CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de plus de 270 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2021

L'organisme de formation continue du CNRS présente un large panel de stages courts (3 jours en moyenne) dans tous les domaines : des biotechnologies à la synthèse chimique en passant par l'intelligence artificielle, le big data et les enjeux sociétaux.

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de **former plus de 1600 professionnels chaque année** issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

DECOUVREZ QUELQUES STAGES PROPOSÉS PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES

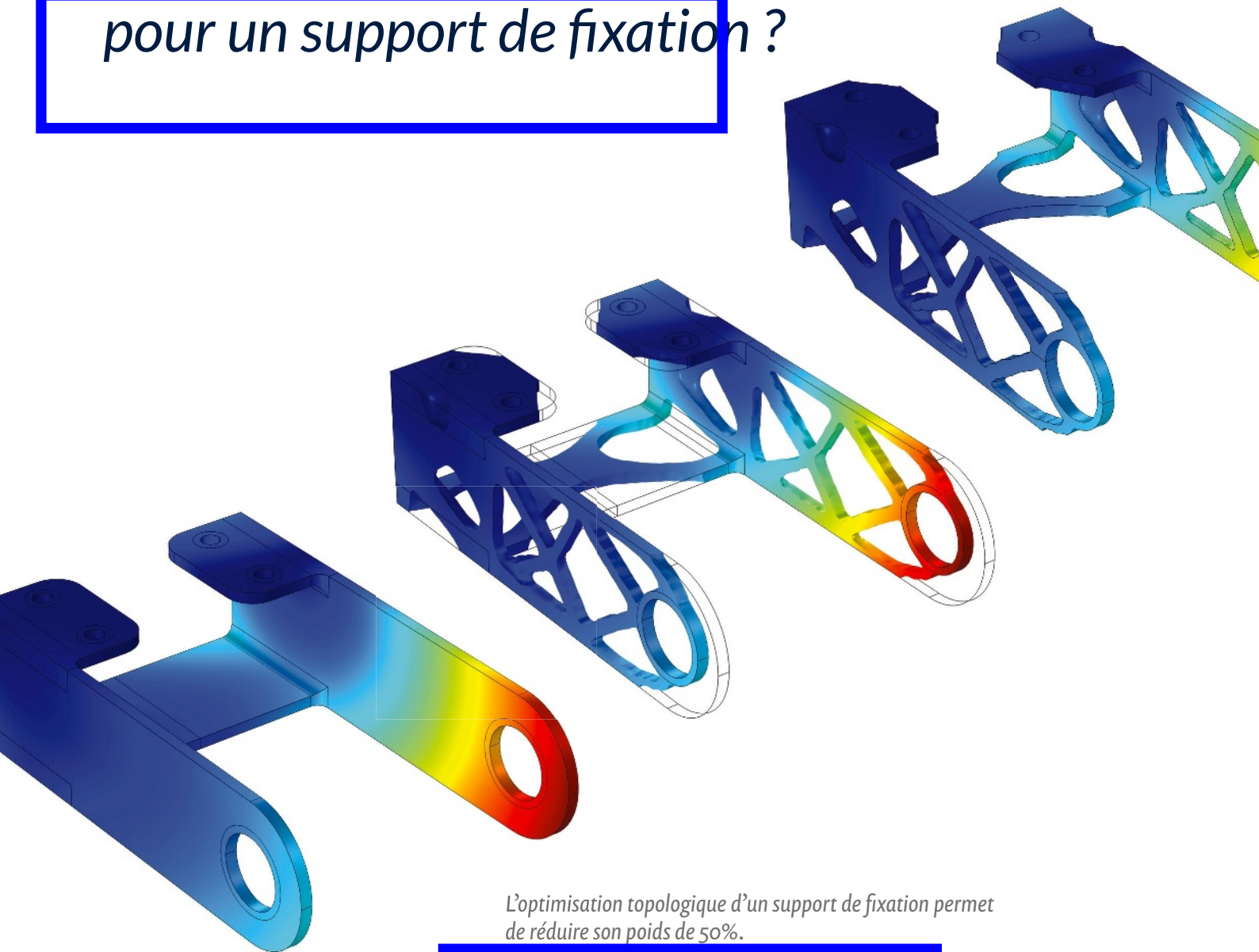
■ DONNÉES, CONNAISSANCES, MÉTHODES	■ PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION	■ BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLECULAIRE
ANALYSE DE DONNÉES Analyser des données du 27 au 29/01/2021 MONTPELLIER - 2,5 jours - 1 700 €	FABRICATION ADDITIVE : DÉPÔT PAR JET D'ENCRE du 22/02 au 24/02/2021 TOULOUSE - 2 jours	MEMOIRE ET PATCH du 12 au 16/04/2021 VALBONNE - 5 jours - 2 400 €
DEEP LEARNING POUR LE TRAITEMENT DE L'ANALYSE D'IMAGES MÉDICALES du 27 au 29/01/2021 VILLEURBANNE - 2,5 jours - 1 600 €	MEMOIRE ET PATCH du 29/09 au 01/10/2021 GRENOBLE - 2 jours - 1 000 €	BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE du 04 au 05/11/2021 GIE-SUR-WETTE - 2 jours - 1 000 €
BIOINFORMATIQUE Bioinformatique pour la médecine du 10 au 12/05/2021 MONTPELLIER - 2,5 jours - 1 000 €	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX du 17 au 19/02/2021 STRASBOURG - 3 jours - 1 500 €	BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES du 06/04/2021 A distance - 0,5 jours - 300 €
GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION Orchestrateur Kubernetes (concepts et pratique) du 26 au 27/05/2021 GRENOBLE - 2 jours - 1 000 €	CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS du 07 au 08/04/2021 NANCY - 1,5 jours - 700 €	QUALITÉ ET SÉCURITÉ Evaluation du risque chimique : méthode d'application du 01 au 02/07/2021 GIE-SUR-WETTE - 2 jours - 1 000 €
TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT LiDAR et photogrammétrie pour la numérisation de terrain : instrumentation, mesure et modélisation du 08 au 11/03/2021 CAEN - 3,5 jours - 1 200 €	CHIMIE ANALYTIQUE Utilisation de la spectrométrie de masse à haute résolution (HR-MS) : principe et applications du 28/02 au 02/04/2021 PALAISEAU - 3,5 jours - 1 800 €	SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE Technologie et intelligence artificielle du 04/06/2021 BORDEAUX - 1 jour - 500 €
SCIENCES DE L'INGÉNIEUR Accueillir et dialoguer en Duthon du 01 au 02/03/2021 GIE-SUR-WETTE - 4 jours - 1 600 €	MICROSCOPIE ET IMAGERIE Histologie : de la préparation à l'analyse du 22 au 25/03/2021 NANTES - 4 jours - 1 800 €	COGNITION ET COMPORTEMENT Faire évoluer un comportement : l'exemple de la robotique du 05/02/2021 LILLE - 1 jour - 500 €

Découvrez l'ensemble des stages de formation 2020 et 2021 sur cnrsformation.cnrs.fr

ou contactez nous à efc.contact@cnrs.fr ou 01 69 02 44 55



Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



L'optimisation topologique d'un support de fixation permet de réduire son poids de 50%.

Cela dépend des objectifs de conception. Les méthodes d'optimisation topologique permettent de trouver la meilleure version possible d'une structure pour un usage spécifique. Un support peut être optimisé pour un seul type de chargement, tandis qu'un autre est optimisé pour huit. La fonctionnalité Density Model simplifie le processus d'optimisation topologique pour les ingénieurs en calcul de structure.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour l'optimisation topologique.

comsol.blog/density-topology