



SCIENCE

JANVIER 2019
N° 495

GÉOSCIENCES

**UN VOLCAN
SOUS L'INFLUENCE
DE LA LUNE**

PALÉONTOLOGIE

**LES DINOSAURES,
POULIDORS
DE L'ÉVOLUTION**

MATHÉMATIQUES

**L'ANALYSE
DE FOURIER, CLÉ
DU NUMÉRIQUE**

ET SI LA GRAVITÉ N'ÉTAIT PAS QUANTIQUE ?

**La théorie qui bouscule
60 ans de recherches**

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

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

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Direction financière: Cécile André
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: Romain Amiot, Silvana Condemi, Chantal Ducoux, Thomas Ferrand, Xavier Müller, Claude Murat, Vincent Wieczny

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

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

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

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

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

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



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

POUR SORTIR DE LA CRISE, SUS À L'ORTHODOXIE!

La partie de la physique théorique qui s'intéresse aux quatre interactions fondamentales connues traverse ces temps-ci ce qu'il faut bien appeler une crise. Trois de ces interactions sont décrites de façon unifiée par le « modèle standard de la physique des particules », édifice théorique achevé au début des années 1970. La quatrième, la gravitation, fait bande à part: elle relève de la théorie de la relativité générale, mise au point par Einstein en 1915. Or le modèle standard est une théorie obéissant aux principes de la physique quantique, tandis que la relativité générale repose sur des concepts classiques, donc très différents.

Cette schizophrénie heurte les physiciens et leur sens de l'esthétique ou de la symétrie, fortement aiguë par les découvertes du xx^e siècle. C'est donc naturellement qu'ils ont recherché une théorie quantique permettant d'englober la gravitation. Seulement voilà, après une soixantaine d'années d'efforts acharnés et d'idées brillantes, une théorie quantique de la gravitation manque toujours. Et pour couronner le tout, le modèle standard, que l'on sait pourtant incomplet, ne montre aucune faille susceptible d'orienter vers une théorie meilleure – tandis que l'espoir de découvrir expérimentalement et dans un avenir proche de nouvelles particules, indicatrices d'une nouvelle physique, est bien mince.

Comment sortir de l'impasse? Antoine Tilloy décrit ici une issue possible (voir pages 28 à 37): faire l'hypothèse très peu orthodoxe que la gravitation reste d'essence classique et chercher à la coupler avec la matière, d'essence quantique. Pour ce faire, explique-t-il, on est amené à s'interroger sur les concepts fondamentaux de la physique quantique – c'est-à-dire à remettre en question l'interprétation orthodoxe de cette théorie, qui prévaut depuis près de cent ans.

En cherchant une meilleure théorie de la gravitation, finira-t-on ainsi par mieux comprendre les très étranges lois auxquelles obéit le monde quantique? On assisterait alors à l'un de ces cocasses retournements de situation dont l'histoire a le secret. ■

SOMMAIRE

N° 495 /
Janvier 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- L'inosine, ingrédient possible des débuts de la vie
- Antibiorésistance: impact en hausse en Europe
- Les premières machines molles artificielles
- Des fractales quantiques
- Grippe: un traitement universel grâce au lama?
- Une preuve de l'avantage des ordinateurs quantiques
- Un processus culturel chez la drosophile
- Les plus anciennes peintures sont à Bornéo

P. 20

LES LIVRES DU MOIS

P. 22

AGENDA

P. 24

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Limiter la vitesse des voitures autonomes?
Gilles Dowek

P. 26

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES

Repousser le dernier moment
Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 38

GEOSCIENCES

LE RUAPEHU, UN VOLCAN SENSIBLE À LA LUNE

Corentin Caudron

On sait que la Lune ne fait pas pousser les cheveux ni ne déclenche les naissances. Mais l'astre de la nuit agit sur les marées... et peut-être sur les volcans.



P. 54

MATHÉMATIQUES

L'ANALYSE DE FOURIER, PILIER DU NUMÉRIQUE

Patrick Flandrin, Stéphane Jaffard et Jean-Michel Morel

Représenter une fonction quelconque sous la forme d'une somme de fonctions élémentaires: cette méthode, mise au point au XIX^e siècle par Joseph Fourier, a connu plusieurs avatars récents et joue un rôle clé dans la révolution numérique.



P. 44

BIOLOGIE

LA GÉNÉALOGIE D'UNE TUMEUR

Jeffrey Townsend

Dans un cancer, le principal danger vient des métastases de la tumeur primaire. La détermination de l'arbre de parenté des tissus cancéreux chez un même patient a montré que ces tumeurs secondaires ont pour origine plusieurs mutations clés survenues très tôt dans le foyer initial.



P. 64

PALEONTOLOGIE

LE TRIOMPHE IMPROBABLE DES DINOSAURES

Stephen Brusatte

L'histoire était entendue: à leur apparition, les dinosaures avaient vite surpassé les autres vertébrés. Faux, indiquent de nouveaux fossiles. Rien ne prédestinait les terribles lézards à devenir les maîtres du Mésozoïque.



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

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



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :
© Agsandrew/Shutterstock.com

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot



P.74

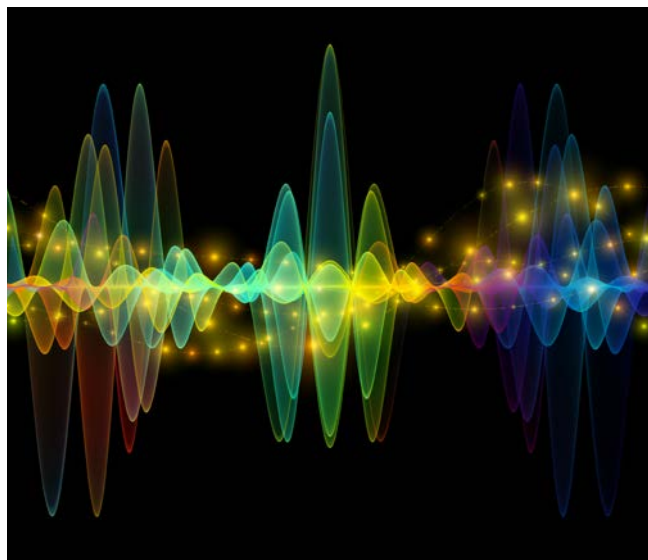
HISTOIRE DES SCIENCES

LA CONTROVERSE DE LA GÉLATINE

Fani Papadopoulou

Au début du XIX^e siècle, un industriel mit au point un dispositif pour extraire la gélatine des os à grande échelle et proposa de l'utiliser pour nourrir malades, personnel hospitalier, soldats, marins et pauvres. Mais la substance était-elle réellement nutritive?

À LA UNE



P.28

PHYSIQUE THÉORIQUE

ET SI LA GRAVITÉ N'ÉTAIT PAS QUANTIQUE?

Antoine Tilloy

Les tentatives d'échafauder une théorie quantique de la gravitation ont jusqu'ici échoué. Des physiciens explorent une autre voie, où cette force resterait de nature classique. Mais cela implique de repenser les fondements de la physique quantique.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

RANGER AU MIEUX DES CARRÉS, DES CERCLES...

Jean-Paul Delahaye

Disposer des formes géométriques identiques dans le plus petit espace possible: les problèmes de ce type attirent non seulement les amateurs de récréations mathématiques, mais aussi des chercheurs de métier.

P.86

ART & SCIENCE

Entrer dans la lumière

Loïc Mangin



P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Dépressions sur Terre... et dans l'évier

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Le Lego de la coagulation sanguine

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Un café qui a plus de goût que le café

Hervé This

P.98

A PICORER

A

CTUALITÉS

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

BIOCHIMIE

L'INOSINE, INGRÉDIENT POSSIBLE DES DÉBUTS DE LA VIE



La molécule d'ARN est constituée de nucléotides caractérisés par quatre types de nucléosides notés A, T, G, U. Les conditions de la Terre primitive permettaient peut-être la synthèse d'une forme d'ARN proche, où l'inosine remplace G, la guanosine.

La molécule d'ARN a-t-elle eu un rôle crucial dans l'émergence de la vie sur Terre ? Peut-être, si l'un de ses constituants était l'inosine et non la guanosine.

L'une des grandes énigmes de la science est l'origine de la vie. Celle-ci serait apparue sur Terre il y a plus de trois milliards d'années, mais comment ? Dans le scénario de « l'hypothèse du monde à ARN », l'acide ribonucléique, ou ARN, aurait eu une place centrale très tôt dans cette histoire. Mais cette piste s'accompagne de nombreuses questions. Notamment, les composés présents sur la Terre primitive permettaient-ils la synthèse de l'ARN ou d'une forme apparentée ? Jack Szostak, de l'université Harvard, et ses collègues ont étudié

une molécule, l'inosine, qui pourrait avoir joué un rôle clé dans ce scénario.

L'ADN est le support de l'information génétique. Il contient les instructions pour la production de protéines, mais sa réplique n'est possible qu'avec des catalyseurs, des protéines. Dès lors, on imagine mal l'ADN en tant que précurseur de la vie. En 1982, Thomas Cech et Sidney Altman (Prix Nobel de chimie en 1989) ont ouvert une autre piste en découvrant que l'ARN, très proche chimiquement de l'ADN et capable de transporter de l'information génétique, peut aussi avoir un rôle de catalyseur, comme les protéines.

Mais l'ARN, molécule complexe, peut-il être produit par des processus de chimie prébiotique, c'est-à-dire à partir des composés présents sur Terre avant l'apparition de la vie ? Peut-être. Une autre possibilité serait que la vie ait débuté avec des molécules plus simples et que l'ARN se soit formé plus tard. De nombreux chercheurs étudient cependant « l'hypothèse du monde à ARN » où cette molécule aurait été produite directement dans des conditions prébiotiques.

Produite comment ? Même si l'ARN peut avoir un rôle de catalyseur, on ne connaît pas de processus non enzymatiques (donc en l'absence de certaines protéines) par lesquels l'ARN, dans sa forme actuelle, pourrait se répliquer sans trop d'erreurs. Une solution est d'imaginer que les premières formes de vie auraient

contenu un ARN primordial très proche de l'ARN actuel, mais avec quelques différences, notamment dans les bases nucléiques. L'ARN est en effet une longue chaîne de nucléotides comportant chacun une des quatre bases que sont l'adénine (A), la guanine (G), la cytosine (C) et l'uracile (U). Si l'on connaît des processus prébiotiques efficaces pour synthétiser la cytosine et l'uracile, ce n'est pas le cas pour les deux autres. L'adénine et la guanine appartiennent à la famille des purines, composés dont la structure repose sur celle de la purine, une molécule azotée cyclique. Or en 2017, Jack Szostak et des collègues ont mis en évidence la possibilité de former certaines purines, des oxo-8-purines, dans des conditions prébiotiques.

Dans leur nouvelle étude, Jack Szostak et son équipe ont examiné la possibilité de construire des ARN où des oxo-8-purines remplacent les bases A et G. Les chercheurs ont examiné deux facteurs importants : la rapidité de la réplication et la fiabilité de ces ARN modifiés. En effet, l'ARN est une molécule qui se dégrade vite. Sa réplication doit donc se réaliser assez rapidement. Mais elle doit aussi se faire avec un nombre limité d'erreurs, afin que l'information génétique que l'ARN représente ne soit pas trop altérée.

Les chercheurs ont mis des oxo-8-purines en présence de brins d'ARN, en cours d'autoassemblages selon un motif imposé. Ils ont constaté que dès que ces purines s'ajoutaient à la chaîne, la fixation d'autres nucléotides était ralentie, tandis que le nombre d'erreurs dans la synthèse devenait très important.

Ces candidats ont donc été écartés. Une autre purine, l'inosine, a été testée. Des chercheurs avaient suggéré que l'inosine n'était pas un bon candidat, mais l'équipe de Jack Szostak l'a étudiée dans des conditions proches de celles de la Terre prébiotique. Et a montré que l'inosine remplaçait la guanosine (la base guanine associée à un ribose dans l'ARN) sans perturber la réplication des brins d'ARN.

L'ARN primordial contenait donc peut-être, à la place de la guanosine, de l'inosine. Sachant que celle-ci s'obtient par une réaction de désamination de l'adénosine (la base adénine associée à un ribose), la question est maintenant : comment l'adénosine était-elle produite dans les conditions prébiotiques? ■

SEAN BAILLY

S. C. Kim *et al.*, *PNAS*, en ligne le 3 décembre 2018

Antibiorésistance : impact en hausse en Europe

Les 672 000 infections à bactéries résistantes aux antibiotiques comptabilisées en Europe en 2015 ont causé environ 33 000 décès, selon une vaste étude menée par le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC). Le point avec Mélanie Colomb-Cotin, de Santé publique France, qui a coordonné la partie française.



Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

MÉLANIE COLOMB-COTINAT
épidémiologiste de Santé publique France, à Saint-Maurice

Comment avez-vous procédé ?

Nous avons utilisé à la fois des données de surveillance et des données déjà publiées. Des laboratoires volontaires déclarent les cas de bactériémie (présence de bactéries dans le sang) à bactérie résistante au réseau national de chaque pays européen, lequel envoie les données à l'ECDC. À partir de là, nous avons estimé le nombre de cas d'autres types d'infection avec la même bactérie : infections urinaires, ostéoarticulaires, pneumopathies... Puis, de là, la mortalité et la perte de qualité de vie, calculée en « années de vie ajustées sur l'incapacité » (DALYs). Cet indicateur représente le nombre total d'années perdues par une population à cause d'un décès ou d'une incapacité liés aux infections considérées.

Pourquoi vous être concentrés sur 16 bactéries résistantes ?

On ne surveille pas tout. Les bactéries très résistantes mais très peu pathogènes comme les staphylocoques blancs ne font pas l'objet d'une surveillance nationale, par exemple. Nous nous sommes donc focalisés sur celles à la fois résistantes et qui occasionnent le plus fréquemment des infections, ainsi que sur les bactéries ultrarésistantes émergentes.

Quels sont les principaux résultats ?

Le premier est le poids énorme de l'antibiorésistance. Près de 700 000 infections recensées ! En termes d'années de vie perdues, l'impact des infections à bactéries résistantes – près de 900 000 DALYs – équivaut à celui de la grippe, de la tuberculose et du sida cumulés. Les populations les plus touchées sont par ailleurs les personnes de plus de 65 ans et les enfants de moins de 1 an. Nous avons aussi pu comparer nos résultats avec ceux d'une autre étude de l'ECDC fondée sur des

données de 2007. Cette étude s'appuyait sur une méthodologie différente, mais en réappliquant sa méthodologie à nos données, nous avons montré que globalement les nombres d'infections et de décès dus aux 16 bactéries résistantes étudiées ont plus que doublé entre 2007 et 2015 ; même si, pour quelques-unes, comme le staphylocoque doré résistant à la méticilline, ces nombres diminuent dans beaucoup de pays.

Quelle est la situation en France ?

Le staphylocoque doré résistant à la méticilline, qui était il y a une dizaine d'années la cause principale d'infections à bactéries résistantes, est en très forte diminution grâce à la politique de prévention mise en place. Les infections associées survenant principalement en milieu hospitalier, cette politique a consisté en grande partie à adopter des mesures d'hygiène. En revanche, l'impact des entérobactéries résistantes aux céphalosporines de troisième génération a considérablement augmenté. Ces bactéries de la flore intestinale entraînent facilement des infections graves, que l'on a beaucoup traitées avec de telles céphalosporines. Leur résistance à cette classe d'antibiotiques est ainsi en hausse depuis 10-15 ans en Europe. Le phénomène est inquiétant, car il ne reste ensuite qu'une seule classe d'antibiotiques pour traiter le patient, les carbapénèmes. Or on voit déjà apparaître des résistances aux carbapénèmes.

Comment renforcer la lutte ?

Il faut agir sur tous les leviers en même temps : le bon usage des antibiotiques et les mesures d'hygiène, avec une vision globale du problème. Les bactéries se propagent entre l'environnement, l'animal et l'humain. La prévention repose sur des mesures simples appliquées à tous ces niveaux : se laver les mains en rentrant chez soi, ou avant de prendre soin d'une personne ou d'un animal, ainsi qu'après, ou après s'être mouché, par exemple. ■

A. Cassini *et al.*, *Lancet Infectious Diseases*, en ligne le 5 novembre 2018

TECHNOLOGIE

LES PREMIÈRES MACHINES MOLLES ARTIFICIELLES

Inspirés par la croissance des organes et des plantes, les baromorphes sont des actionneurs en élastomère qui, en une fraction de seconde, se gonflent en prenant la forme souhaitée.

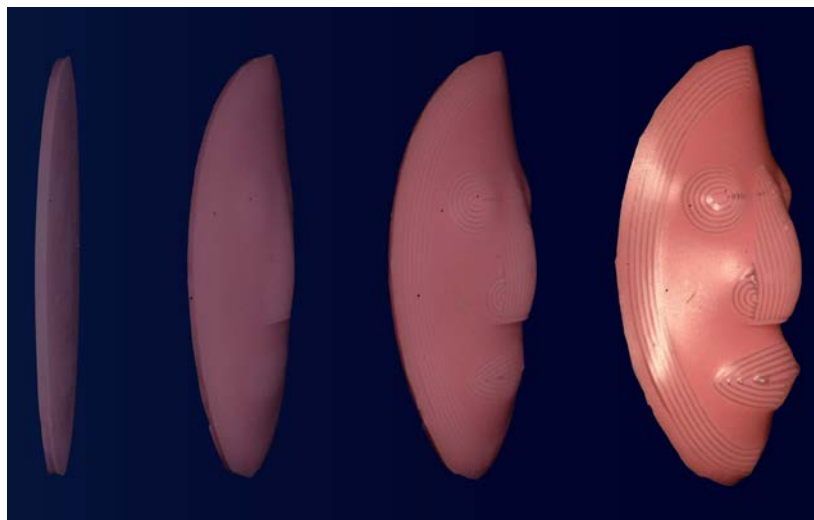
Avez-vous remarqué que votre langue est une étonnante machine? Capable de se tordre et de s'allonger, elle peut avec sa pointe explorer toute zone de votre bouche. Les pieuvres ont huit outils de ce genre et la nature regorge d'exemples de telles «machines molles» capables de prendre très vite une forme utile. En inventant les «baromorphes», Emmanuel Siéfert et ses collègues, à l'ESPCI, à Paris, viennent de franchir un grand pas vers la réalisation de machines molles artificielles.

Les baromorphes sont formés de plaques d'élastomère (caoutchouc synthétique) contenant un réseau de canaux pressurisables. Lorsque de l'air y est insufflé ou aspiré, le dispositif, initialement plan, prend très vite une certaine forme dans l'espace, qui minimise son énergie élastique totale.

Passer d'un plan à une forme tridimensionnelle est difficile. Si l'on peut facilement courber une feuille de papier pour former un tube ou un cornet, il est impossible de lui conférer de la courbure dans deux directions à la fois sans la froisser. Les chercheurs ont résolu ce problème en imitant la croissance des organes ou des plantes: certaines parties de ces objets biologiques grandissent plus vite que d'autres, ce qui rend possible tous les types de forme. De façon similaire, dans un baromorphe, les parcours des canaux et leur densité déterminent l'amplitude et la direction de la croissance en chaque lieu. La forme atteinte par gonflement est ainsi codée dans le matériau.

Cependant, pour programmer à volonté une mise en forme par gonflement, il faut résoudre le problème inverse, c'est-à-dire déduire de cette forme les contraintes locales qui doivent régner et, partant, le cheminement des canaux et la valeur de la pression intérieure à appliquer pour conférer au baromorphe la forme voulue. Emmanuel Siéfert et ses collègues ont trouvé une méthode simple pour résoudre ce problème.

Ils ont remarqué que l'on peut déployer la forme recherchée en supposant que les canaux nécessaires suivent les projections sur le plan des courbes de niveau (lignes d'altitude constante) et monteront verticalement lors du



Ce baromorphe, initialement plat, prend sa forme de visage en moins d'une seconde quand on le gonfle.

3 HERTZ
C'EST LA FRÉQUENCE À LAQUELLE LES CHERCHEURS DE L'ESPCI ONT MIS EN ŒUVRE LE GONFLEMENT ET DÉGONFLEMENT DE LEUR ACTIONNEUR MOU EN FORME DE CÔNE.

gonflement. Si l'on fait cette approximation, alors la contrainte régnant en chaque point peut être calculée à partir de la pente perpendiculaire à la courbe de niveau dont le point fait partie. Cela permet de déterminer l'orientation et la densité des canaux à mettre en place dans le baromorphe dégonflé (une plaque plane). Il suffit alors de régler la pression intérieure à appliquer pour obtenir la forme recherchée.

Les chercheurs ont réalisé leurs premiers essais sur un dispositif capable de prendre en une fraction de seconde la forme d'un cône. Ils ont ensuite prouvé l'efficacité de leur méthode en fabriquant des baromorphes capables de se gonfler aussi vite en un bol, une selle et même une sorte de visage (voir les photos ci-dessus).

Ces dispositifs peuvent être très vite gonflés ou dégonflés; ils ont par ailleurs la facilité d'usage que permet la pneumatique, et la solidité et la résistance que leur confère l'élastomère. Une nouvelle famille d'actionneurs est ainsi née: les actionneurs mous, qui pourraient trouver de nombreuses applications, robotiques ou autres. Du reste, l'ESPCI, l'organisme auquel appartiennent les chercheurs, n'a pas manqué de déposer un brevet pour protéger l'invention. ■

FRANÇOIS SAVATIER

E. Siéfert et al., *Nature Materials*, en ligne le 19 novembre 2018

UNE SUPER-TERRE À DEUX PAS D'ICI

Distante de seulement six années-lumière, l'étoile de Barnard est la quatrième étoile la plus proche du Soleil. Grâce à diverses méthodes d'observation et plus de vingt ans de données, Ignasi Ribas, de l'institut des études spatiales de Catalogne, à Barcelone, et ses collègues ont montré que cette étoile naine rouge est accompagnée d'une exoplanète de type super-Terre. La période de révolution de celle-ci est de 233 jours et sa masse est au moins 3,2 fois celle de la Terre.

L'ARAIGNÉE QUI ALLAITE

L'allaitement est l'apanage des mammifères... du moins le pensait-on. Si de rares exemples de lactation chez des non-mammifères sont connus, celui de *Toxus magnus*, une araignée sauteuse, est exceptionnel. Zhanqi Chen, de l'Académie des sciences chinoise, et ses collègues ont montré que les bébés araignées ingéraient des gouttes de lait sécrétées à la base de l'abdomen de la mère. En outre, ce fluide nutritif est indispensable à la croissance et la survie des petits jusqu'à l'âge adulte.

DES VIRUS GÉANTS TROUVÉS EN FORÊT

La découverte des virus géants a bousculé notre vision du monde des microorganismes. Jusqu'à récemment, les virus étaient considérés comme plus petits que les bactéries et dotés d'un génome plus restreint. Or les virus géants rivalisent de taille avec certaines bactéries. Alors que la plupart ont été découverts en milieu aquatique, Jeffrey Blanchard, de l'université du Massachusetts, et ses collègues viennent de découvrir par hasard seize nouveaux virus géants dans le sol de la forêt près de leur laboratoire.

SOUTIEN SOCIAL CHEZ LA HYÈNE

Dans les sociétés de mammifères, les chefs de clan sont très souvent des mâles. Cette dominance a longtemps été expliquée par la testostérone, une hormone masculine. En effet, celle-ci stimule la croissance, le développement des muscles et l'agressivité d'un individu, le rendant plus compétitif. Mais alors, comment expliquer l'émergence de sociétés matriarcales, dominées par des femelles, comme chez les hyènes? François Rousset, de l'université de Montpellier, et ses collègues se sont intéressés au cas de ces carnivores sociaux.

Entre 1996 et 2017, les chercheurs ont suivi plus de 700 hyènes en Tanzanie, appartenant à huit clans différents. Ils se sont surtout intéressés à l'issue des confrontations entre individus issus du même clan ou de deux clans différents, en comparant la masse, le sexe et le soutien social des deux hyènes.

Comment définir le soutien social? Les chercheurs ont considéré que la hyène qui bénéficiait du plus grand nombre d'individus apparentés dans le clan disposait du plus grand soutien social. Ce soutien passe surtout par la voie maternelle. Et comme, chez les hyènes tachetées, à l'âge adulte, les mâles quittent le clan pour aller s'accoupler, les femelles sont



En Afrique, les hyènes tachetées (*Crocuta crocuta*) sont connues pour leurs sociétés matriarcales.

avantagées sur le plan du soutien social. « Nous nous sommes rendu compte que ni la masse ni la corpulence ne favorisaient la victoire d'un individu. Les hyènes disposant du plus fort soutien social, généralement les femelles, avaient plus de 75% de chance de remporter le conflit au sein d'un clan », indique François Rousset.

Ces travaux expliquent aussi le comportement de certaines hyènes qui adoptent les petits d'autres femelles, étendant ainsi leur relation de parenté: une stratégie efficace pour gagner en soutien social! ■

CORALINE MADEC

C. Vulliamd et al., *Nature Ecology & Evolution*, en ligne le 19 novembre 2018

LE PARFUM DE LA TRUFFE

Les fins gourmets en raffolent depuis des siècles: la truffe est une denrée gastronomique dont le prix atteint parfois des sommets. Ce trésor comestible des forêts est en fait la fructification de champignons ectomycorhiziens, qui vivent en symbiose avec les racines de certains arbres. Pour comprendre pourquoi chaque espèce de truffe a un parfum unique, Francis Martin et son équipe de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) ont coordonné un consortium international pour séquencer le génome de plusieurs champignons, dont la truffe blanche d'Alba.

Les chercheurs ont ainsi montré que le cocktail de composants organiques volatils responsable des parfums des truffes est composé d'une cinquantaine de molécules. Ce mélange, différent d'une espèce à l'autre, reposerait surtout



La truffe blanche d'Alba (*Tuber magnatum*), la plus chère, pousse essentiellement dans le Piémont, en Italie.

sur l'expression différentielle d'un répertoire de gènes que l'on retrouve chez toutes les truffes. Les différents parfums spécifiques à chaque espèce de truffes dépendraient donc de l'activité sélective de certains gènes, plutôt que de l'absence ou de la présence de ces derniers. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

C. Murat et al., *Nature Ecology and Evolution*, vol. 2, pp. 1956-1965, 2018

EN IMAGE

DES FRACTALES QUANTIQUES

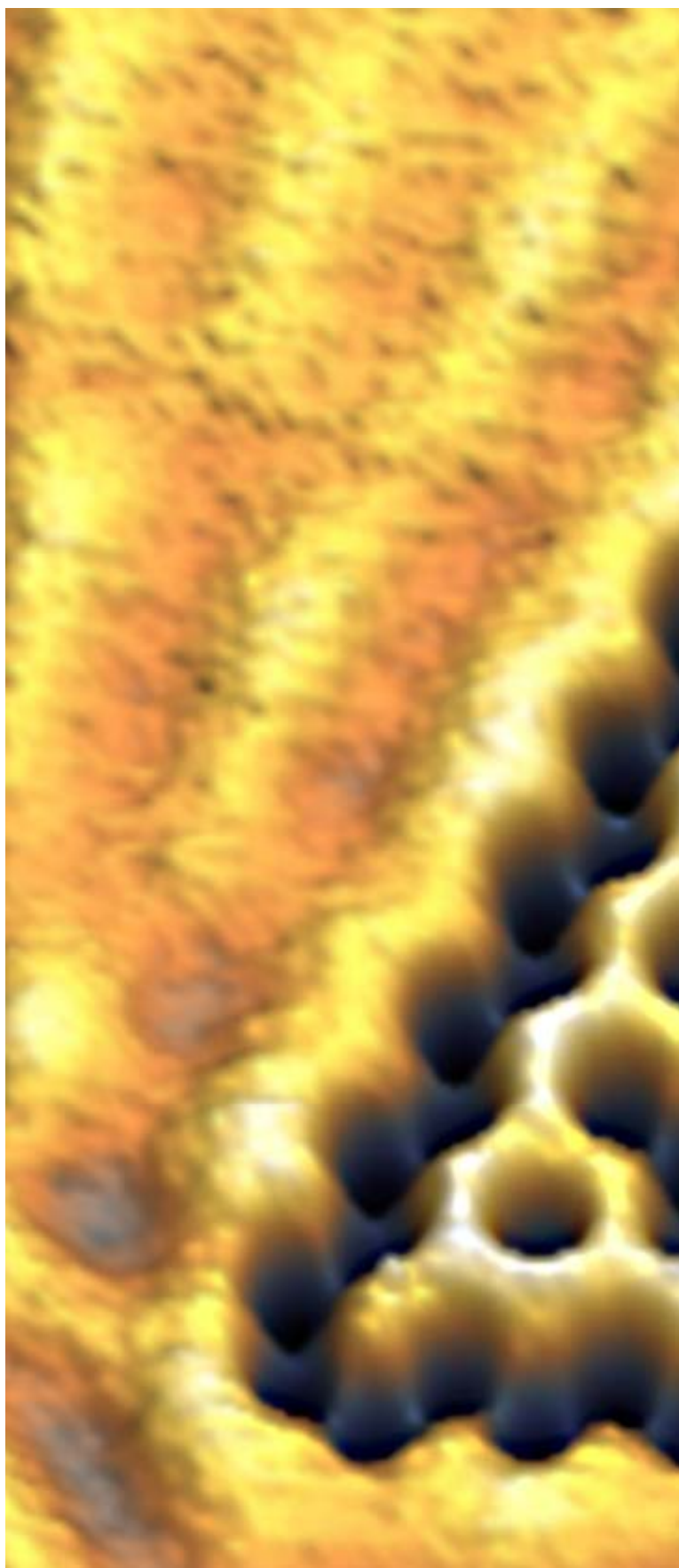
Dans un chou romanesco, le même motif semble se reproduire à différentes échelles: c'est un exemple de structure fractale. Une propriété des fractales est qu'il est possible de leur attribuer une dimensionnalité non entière. Cette idée a inspiré l'équipe de Cristiane Morais Smith, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, en vue de construire des systèmes quantiques de dimension non entière et d'y étudier la dynamique des électrons.

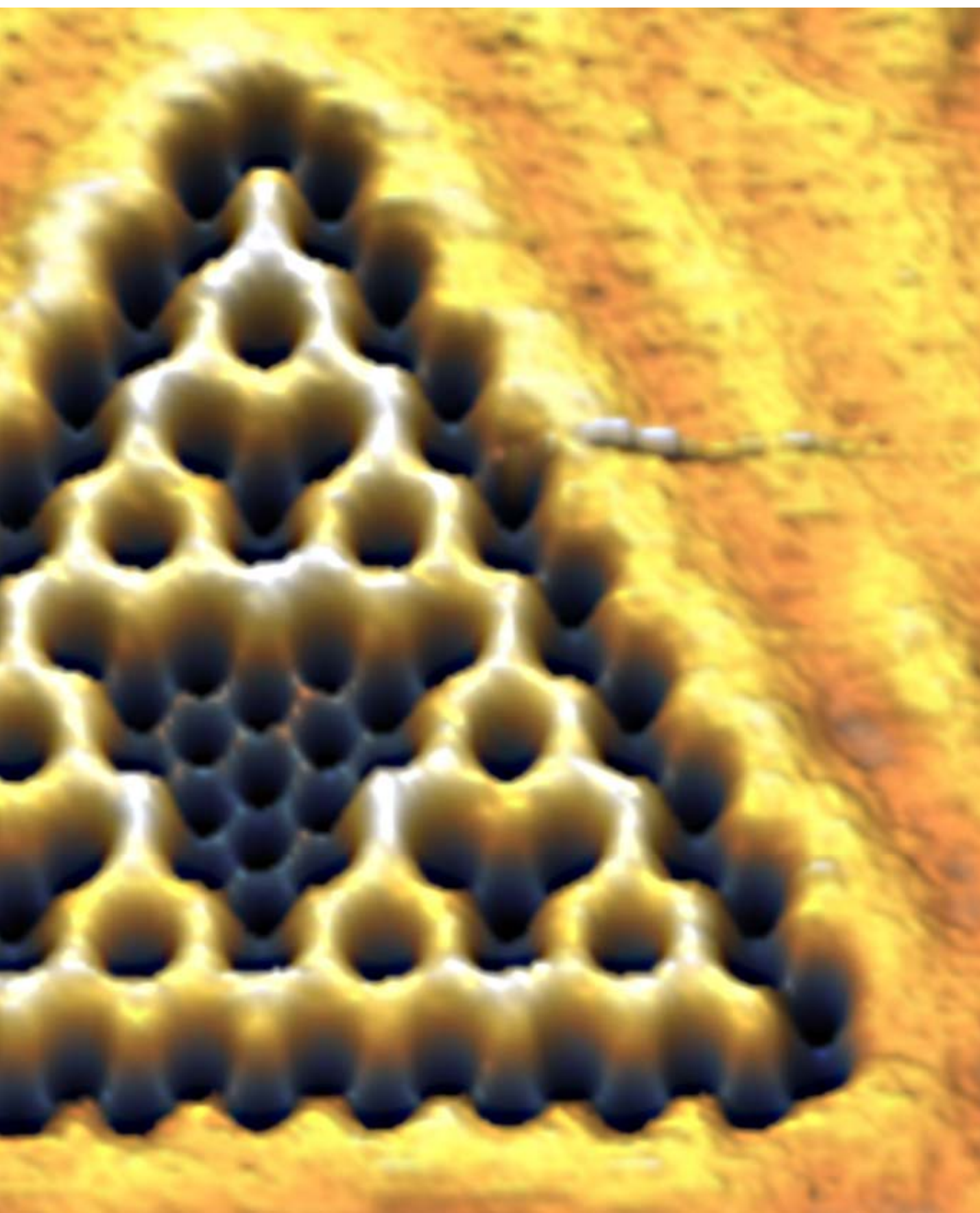
En effet, la dimensionnalité d'un système influe sur son comportement quantique. Certains phénomènes n'existent que dans des dispositifs à une dimension tels qu'une chaîne d'atomes, ou à deux dimensions, la bidimensionnalité étant notamment nécessaire pour qu'il y ait un effet Hall quantique. Mais comment se comporteraient des électrons dans un système de dimension non entière, comprise entre 1 et 2 par exemple? La dynamique serait-elle celle d'un matériau de dimension 1, de dimension 2 ou quelque chose d'intermédiaire?

Cristiane Morais Smith et ses collègues ont construit une structure fractale inspirée du triangle de Sierpiński. Celui-ci est un exemple simple de fractale, de dimension égale à 1,58. Sa construction commence avec un triangle équilatéral. On accole par leurs sommets trois de ces triangles pour former un triangle équilatéral plus grand (avec un trou équilatéral). On reprend trois fois cette structure pour construire un triangle plus grand, et ainsi de suite. Reproduite à l'infini, la procédure conduit à une structure qui, à toutes les échelles, présente le même motif.

Sur un substrat de cuivre, dans lequel les électrons circulent librement, les chercheurs ont disposé, grâce à la pointe d'un microscope à effet tunnel, des molécules de monoxyde de carbone de façon à former un triangle de Sierpiński (*ci-contre*). Ces molécules servent de barrière pour les électrons. Les chercheurs ont alors utilisé des techniques spectroscopiques pour mesurer la fonction d'onde électronique, l'objet mathématique qui décrit le comportement des électrons dans le système. Ils ont montré que le caractère fractal du triangle de Sierpiński de dimension 1,58 se reflète dans les propriétés de cette fonction d'onde. Ces travaux inaugurent un vaste champ d'étude: les propriétés quantiques des systèmes fractals pourraient se révéler très surprenantes. ■

S. B.

S. N. Kempkes et al., *Nature Physics*, en ligne le 12 novembre 2018



VIROLOGIE

GRIPPE : UN TRAITEMENT UNIVERSEL GRÂCE AU LAMA ?

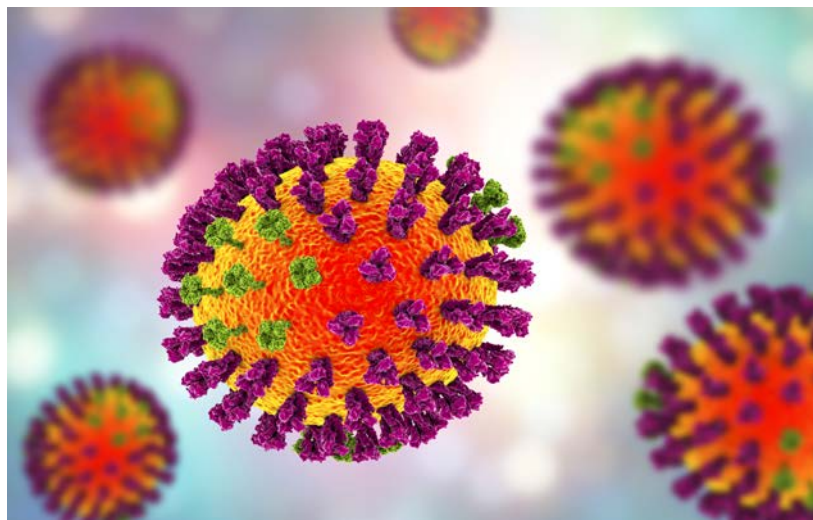
Une injection d'anticorps de lamas sous forme d'aérosol nasal offre une nouvelle stratégie pour remplacer la classique vaccination contre la grippe saisonnière.

La grippe saisonnière, causée par des virus *influenza* de types A et B majoritairement, entraîne chaque année jusqu'à 650 000 décès dans le monde. Or il existe un très grand nombre de souches de ces virus, qui mutent régulièrement. Aujourd'hui, la prévention passe par un vaccin qui assure une protection contre seulement quatre souches, sélectionnées chaque année par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en fonction de leur probabilité de prédominer dans l'épidémie à venir. Un pari qui n'est pas toujours gagnant. À la recherche d'une solution plus universelle, Ian Wilson, de l'institut américain de recherche Scripps, et ses collègues ont décidé d'explorer une autre piste, grâce à un animal pour le moins inattendu : le lama.

La stratégie classique de vaccination consiste à introduire des souches inactivées de virus dans le corps pour lui faire produire des anticorps, qui élimineront le virus en cas de réelle infection. Dans le cas de la grippe, les anticorps ciblent une protéine de surface du virus, l'hémagglutinine, et plus précisément la tête de cette protéine, région plus facile d'accès pour le système immunitaire. Mais cette tête a l'inconvénient d'être très variable (la fréquence de ses mutations est élevée) et spécifique de chaque souche de virus. D'où la difficulté d'obtenir une protection large, au-delà des quelques souches retenues pour le vaccin annuel.

En vue d'une protection universelle, Ian Wilson et ses collègues se sont intéressés au lama, connu pour produire des anticorps de petite taille, capables de cibler des régions de l'hémagglutinine moins accessibles, mais aussi plus stables d'une souche virale à l'autre.

Les chercheurs ont isolé quatre anticorps du lama efficaces contre certaines souches de grippe. Ils ont alors fabriqué un gène dont l'expression rassemble en un seul anticorps des parties des quatre anticorps du lama. Cette fusion est avantageuse : l'anticorps final cible *in vitro* au moins soixante souches de grippe. L'originalité de ces travaux tient alors à la méthode retenue pour faire produire cet anticorps de lama à des souris afin de vérifier son efficacité *in vivo*. S'ils l'ont directement injecté par voie intraveineuse à certaines souris, les chercheurs ont aussi testé



Vue d'artiste du virus de la grippe. L'hémagglutinine (en violet) est une protéine de surface qui est la cible des anticorps. En s'y fixant, ils empêchent le virus d'envahir les cellules de l'organisme.

2 à 8 MILLIONS

C'EST LE NOMBRE DE PERSONNES TOUCHÉES PAR LA GRIPPE EN FRANCE CHAQUE ANNÉE. LE COÛT ASSOCIÉ, EN MÉDECINE AMBULATOIRE SEULE, EST COMPRIS ENTRE 230 ET 840 MILLIONS D'EUROS, AUQUEL IL FAUDRAIT AJOUTER LES HOSPITALISATIONS ET LES PERTES DE PRODUCTION.

Source : Groupe d'expertise et d'information sur la grippe (www.grippe-geiq.com)

chez d'autres une injection intranasale contenant un virus porteur du gène chimérique. Le virus en question, un adénovirus, est inoffensif et couramment utilisé en thérapie génique. Le rôle de ce vecteur est ici d'insérer dans l'ADN des cellules nasales le gène d'intérêt et de leur faire ainsi produire l'anticorps chimérique. L'expérience a montré de bons taux de survie des souris exposées à différentes souches de virus de la grippe. Le vecteur permet, du moins chez la souris, une libération prolongée et ciblée d'anticorps pendant plusieurs mois dans les muqueuses, qui sont le point d'entrée du virus.

«Les résultats obtenus sont très convaincants, mais il faut temporiser : les réactions immunitaires chez la souris et chez l'homme ne sont pas similaires. Ces anticorps de lama pourraient être détruits par notre système immunitaire», souligne Sylvie de Werf, de l'institut Pasteur à Paris. D'autres questions se posent. Pour être utilisé chez l'homme, le vecteur devra réellement assurer une protection pendant toute la saison de la grippe. Enfin, la stratégie devra prouver qu'elle est sans danger et assez efficace pour justifier d'inoculer un organisme génétiquement modifié à des individus sains. ■

NOËLLE GUILLON

N. S. Laursen *et al.*, *Science*, vol. 362, pp. 598-602, 2018

IMPACT AU GROENLAND

Sous le glacier Hiawatha, dans le nord-ouest du Groenland, une structure ronde est apparue lors de sondages au radar. De 30 kilomètres de diamètre, d'une profondeur de 320 mètres, elle présente en son centre une zone surélevée de 50 mètres. Avec des collègues danois, français et anglais, Kurt Kjær, de l'université de Copenhague, y a vu un possible cratère d'impact et entrepris de le prouver. Ce qui a été fait en analysant un échantillon de sédiments transportés par les rivières subglaciaires: il contenait des grains de quartz choqué et des cônes de choc, que seuls les grands impacts peuvent produire. Les chercheurs ont calculé que le cratère observé pourrait être dû à la chute, à quelque 20 kilomètres par seconde, d'un astéroïde ferreux d'environ 1,5 kilomètre de diamètre, en supposant le glacier absent lors de l'impact – dont l'époque reste à déterminer. ■

F. S.

K. Kjær et al., *Science Advances*, vol. 4, article eaar8173, 2018

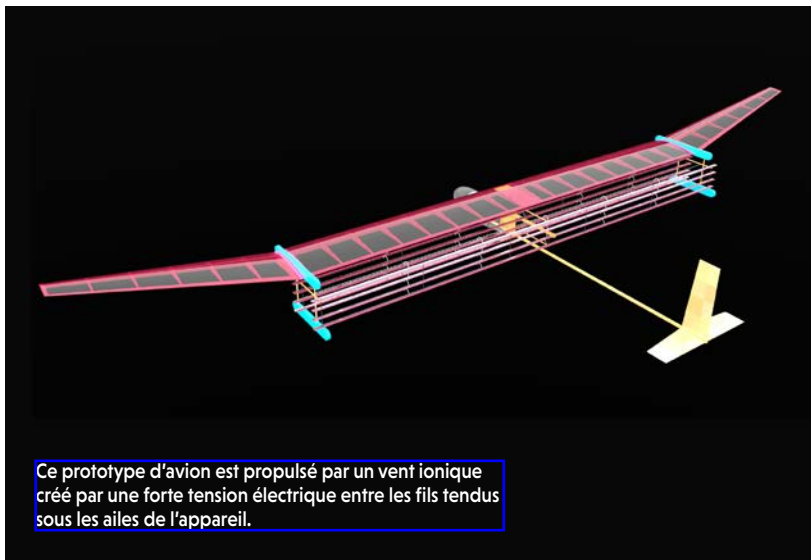
DICYNODONTE MASSIF

Un dicynodonte géant de la fin du Trias (252,2 à 201,3 millions d'années) a été découvert par Tomasz Sulej, de l'Académie des sciences polonaise, et Grzegorz Niedźwiedzki, de l'université d'Uppsala. L'animal, qui a reçu le nom *Lisowicia bojani*, a été mis au jour au sein de sédiments fluviaux en association avec des os de dinosaures dans une ancienne zone humide. Les dicynodontes sont des reptiles mammaliens qui, entre le Permien moyen (272,3 à 259,9 millions d'années) et le Trias final, étaient les herbivores dominants. Jusqu'à présent, on n'en connaissait pas de plus de 1 mètre de long. Or les chercheurs estiment que *Lisowicia* pesait 9 tonnes et mesurait 2,6 mètres de haut. Si ses membres postérieurs ressemblent à ceux des autres dicynodontes, ses membres antérieurs font penser à ceux des grands dinosaures quadrupèdes. Il s'agissait manifestement d'un animal à croissance rapide, vitale pour la survie en bas âge. *Lisowicia* apparaît ainsi comme très similaire à nos éléphants. ■

F. S.

T. Sulej et G. Niedźwiedzki, *Science*, article eaal4853, en ligne le 22 novembre 2018

UN AVION S'ENVOLE GRÂCE AU VENT IONIQUE



Ce prototype d'avion est propulsé par un vent ionique créé par une forte tension électrique entre les fils tendus sous les ailes de l'appareil.

Certaines sondes spatiales, telles *Dawn* ou *BepiColombo*, sont équipées d'un moteur ionique: des atomes sont ionisés et accélérés vers l'arrière, ce qui propulse l'engin vers l'avant. Sur Terre, la faible poussée d'un tel système semble insuffisante pour faire voler un avion. Néanmoins, Steven Barrett, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), s'en est inspiré pour concevoir un prototype d'avion qui vole sans pièce mobile (hélice, rotor, etc.), sans utiliser de carburant et sans émettre directement du dioxyde de carbone.

L'idée est d'utiliser deux jeux de fils tendus le long des ailes et d'établir une forte tension électrique, de 40 000 volts, entre les fils antérieurs et postérieurs. Autour des fils à l'avant, le champ électrique ionise des atomes de l'air qui sont alors accélérés vers les fils à l'arrière. En chemin, ces ions entrent en collision avec de nombreux atomes de l'air et transmettent une part de leur énergie. Ces atomes sont alors poussés vers l'arrière de l'avion et forment le «vent ionique». Par réaction, l'avion avance. Steven Barrett et ses collègues ont utilisé un logiciel d'optimisation pour obtenir un concept d'avion ayant une envergure de 5 mètres pour un poids total de 2,4 kilogrammes. La difficulté a été de concevoir un système de batteries léger capable de produire une tension aussi élevée. Lors d'essais dans le gymnase du MIT, le prototype, préalablement lancé, a atteint une vitesse de 17 kilomètres par heure en volant sur 50 mètres (une distance limitée par la taille du bâtiment). Avec le système éteint, l'avion ne parcourt que 10 mètres.

Si la preuve du concept est faite, l'équipe doit encore relever de nombreux défis: améliorer le rendement du système, adapter un tel dispositif à des avions de plusieurs tonnes, etc. Mais les chercheurs imaginent déjà des appareils utilisant ce système alimenté par des panneaux solaires, et cela sans faire de bruit. ■

S. B.

Haofeng Xu et al., *Nature*, vol. 563, pp. 532-535, 2018

MÉDECINE

BOUGER SON BRAS FANTÔME

Pour des patients amputés au niveau du bras, apprivoiser sa prothèse n'est pas chose aisée. Pour la mobiliser, il faut en effet réussir à effectuer des contractions musculaires puissantes et non naturelles. Mais Nathanaël Jarrassé, de Sorbonne Université, à Paris, et ses collègues ont conçu une prothèse qui ne nécessite ni apprentissage du patient ni intervention chirurgicale. Comment ? En apprenant à la prothèse à décoder les mouvements du « membre fantôme ». On nomme ainsi la sensation, rapportée par certaines personnes amputées, que le membre manquant est toujours relié au corps.

Environ 75% des personnes qui ont un membre fantôme peuvent le bouger mentalement, à un niveau variable selon les patients. De façon intéressante, associées à cette mobilité du membre fantôme, on observe des contractions musculaires au niveau du moignon.

L'équipe a utilisé des techniques d'apprentissage automatique pour entraîner un algorithme à reconnaître le schéma de contraction musculaire propre à chaque mouvement du membre fantôme et propre à chaque patient. Deux patients ont ainsi réussi à saisir, à l'aide de la prothèse – non portée, mais placée près de leur moignon de bras – divers objets et à les lâcher



Grâce à un logiciel qui interprète les mouvements des muscles du moignon, le patient contrôle sa prothèse.

au-dessus d'un récipient. Et ce, après seulement quelques minutes d'entraînement. Un résultat qui ne va pas de soi avec les prothèses actuelles.

« Nous avons apporté la preuve de concept que même sans chirurgie, il est possible d'obtenir des résultats », conclut Jozina de Graaf, neuroscientifique de l'Institut des sciences du mouvement, à Aix-Marseille Université. « Et au-delà de ça, notre travail permet de libérer le tabou du membre fantôme. Il y a encore des patients qui n'osent pas en parler. » ■

ALINE GERSTNER

N. Jarrassé et al., *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, en ligne le 29 novembre 2018

PRÉHISTOIRE

LEVALLOIS TRÈS TÔT EN CHINE

Il y a plus de 400 000 ans, en Afrique, un de nos ancêtres eut l'idée de tailler une pierre pour en faire non pas un outil, mais un bloc dont il pourrait débiter par la suite de nombreux éclats tranchants. Cette technique porte le nom de méthode Levallois. Bo Li, de l'université de Wollongong, en Australie, et ses collègues viennent de prouver que cette méthode était utilisée en Chine il y a 170 000 ans. Son équipe a réévalué par luminescence stimulée optiquement des grains de quartz tirés des strates ayant contenu deux ensembles d'artefacts de type Levallois trouvés dans la grotte de Guanyindong, dans le sud-ouest de la Chine. Grâce à cette technique de datation, qui révèle quand un objet a été exposé au soleil pour la dernière fois, ils ont pu reconstituer une chronologie cohérente des strates d'où proviennent les outils. Il en ressort



Une partie des nucléus trouvés dans la grotte de Guanyindong, en Chine.

que l'un des ensembles d'outils date de 160 000 à 170 000 ans. Cela suggère l'emploi de la méthode Levallois en Chine à cette époque. Par qui ? Par des autochtones ou par de nouveaux arrivants ? On l'ignore, mais une chose est sûre : l'emploi de la méthode Levallois est considéré comme une preuve de modernité cognitive. ■

F. S.

Yue Hu et al., *Nature*, en ligne le 19 novembre 2018

EN BREF

LÉVITATION DIRIGÉE

Un dispositif construit par l'équipe de Jörg Müller, de l'université de Bayreuth, permet de contrôler à distance les mouvements d'un petit objet. Placées en vis-à-vis à 20 centimètres l'une de l'autre, des batteries de transducteurs engendrent des fronts d'ondes ultrasonores opposés, ce qui a pour effet de mettre un petit objet, une balle par exemple, en lévitation. Le réglage subtil des phases relatives des ondes permet ensuite de déplacer l'objet en lévitation à volonté.

LES TOILETTES DE MME DE SÉVIGNÉ

Le « cabinet d'aisance » dont usait Marie de Rabutin-Chantal (1626-1696), alias Mme de Sévigné, quand elle venait visiter sa fille Françoise au château de Grignan, vient d'être découvert dans un placard. Haut de 1,80 mètre sur 0,75 mètre de largeur, il était doté d'une assise constituée de deux blocs de calcaire superposés et enchâssés dans le mur accueillant probablement une chaise percée servant à la fois à recevoir les postérieurs et à protéger la maçonnerie, qui est apparue vierge de déjection.

ANOMALIES PRÉHISTORIQUES DE DÉVELOPPEMENT

Erik Trinkhaus, de l'université de Washington, vient d'observer 75 anomalies du développement dans un échantillon de 66 fossiles humains couvrant le Paléolithique moyen et supérieur. La probabilité cumulée d'une telle répartition de pathologies est quasi nulle. Cela suggère que dans le mode de vie préhistorique, des facteurs universels ont rendu les développements biologiques anormaux très visibles dans le registre fossile. Consanguinité excessive ? Dureté de la vie ? Biais funéraire surexprimant les handicapés ? Aucune explication simple ne tient.

UNE PREUVE DE L'AVANTAGE DES ORDINATEURS QUANTIQUES

Pour la première fois, des chercheurs ont démontré dans un cas particulier que l'ordinateur quantique est réellement plus performant que l'ordinateur classique.

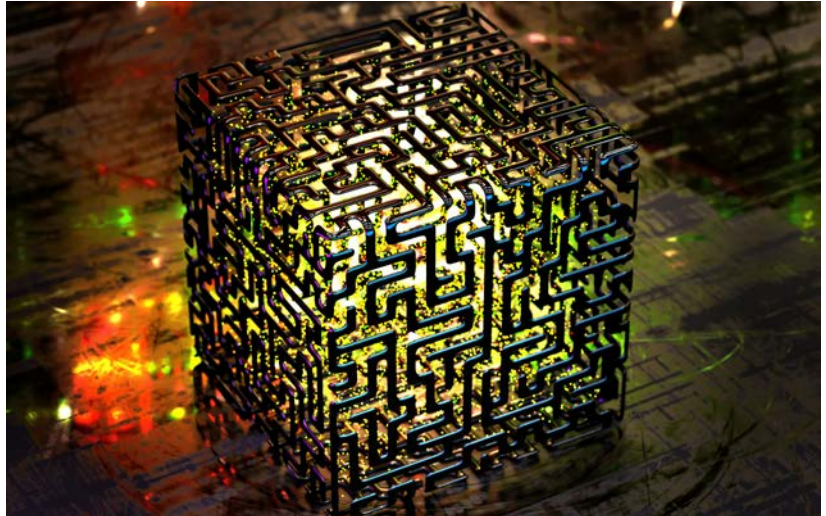
Aujourd'hui encore, la question de la performance d'un ordinateur quantique vis-à-vis de son alter ego classique est loin d'être évidente. Mais Robert König, de l'université technique de Munich, et deux collègues, du centre de recherche d'IBM à New York, viennent d'établir la première preuve formelle de l'avantage d'un ordinateur quantique dans une configuration bien particulière.

L'idée de l'ordinateur quantique est d'exploiter certains principes fondamentaux de la physique quantique, notamment la superposition des états. Ainsi, tandis qu'un bit d'information classique ne peut prendre que la valeur 0 ou 1, un bit quantique, ou qubit, peut être dans une superposition des états 0 et 1. Les propriétés de ce type d'états laissent penser qu'il est possible d'augmenter les capacités et la vitesse de traitement de l'information. L'inconvénient est que les superpositions d'états sont fragiles et sont détruites par la moindre interaction avec leur environnement. Leur maîtrise technique est encore un immense défi.

Plus surprenant, la démonstration de la supériorité de l'ordinateur quantique par rapport à l'ordinateur classique n'est pas non plus formellement établie pour résoudre des problèmes réels, même si certains arguments le suggèrent. Par exemple, l'algorithme (quantique) de Shor pour factoriser des nombres en nombres premiers est plus efficace que tous les algorithmes classiques connus. Cependant, cet argument repose sur une hypothèse forte et non démontrée concernant les algorithmes classiques de factorisation, à savoir qu'il ne peut pas en exister dont le temps de calcul augmenterait comme une fonction polynomiale du nombre à factoriser (si un tel algorithme existait, il serait considéré comme rapide et aussi performant que celui de Shor). Or cette hypothèse pourrait un jour être contredite.

Il existe encore d'autres types d'algorithmes quantiques, notamment utilisés pour effectuer des recherches au sein d'une liste, mais la preuve qu'ils sont plus performants que des algorithmes classiques manque également.

Pour mettre en évidence l'avantage des algorithmes quantiques, Robert König et ses



A quoi ressemblera l'ordinateur quantique de demain ? Il n'y a pas que la réalisation matérielle qui compte. Les performances des algorithmes quantiques sont aussi à l'étude.

1
MILLIARD D'EUROS
C'EST LE BUDGET SUR 10 ANS DU PROJET EUROPÉEN QUANTUM FLAGSHIP, QUI IMPLIQUE DES LABORATOIRES, DES UNIVERSITÉS ET DES INDUSTRIELS. L'OBJECTIF EST DE DÉVELOPPER LES APPLICATIONS DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES.

collègues ont étudié un algorithme particulier qui effectue des opérations sur une chaîne de bits classiques, pour résoudre certains problèmes d'algèbre linéaire. Le temps d'exécution de cet algorithme dans un ordinateur quantique ne dépend pas de la taille de la chaîne de données en entrée. On parle dans ce cas de «circuit quantique à profondeur constante», la «profondeur» définissant d'une certaine façon le nombre d'étapes de calcul dans l'algorithme. Les trois chercheurs ont alors démontré qu'il est impossible de résoudre les problèmes considérés avec un ordinateur classique, car ce dernier nécessite une profondeur croissante si la quantité de données en entrée augmente.

Pour Benoît Valiron, du Laboratoire de recherche en informatique, à l'université Paris-Sud, «ce résultat est intéressant même s'il est très théorique et sans applications pratiques, du moins dans l'immédiat.» Il ajoute cependant que «là où ce résultat entre en résonance avec des choses éventuellement plus concrètes, c'est dans le fait que les circuits à profondeur constante (et faible) seront probablement les premiers systèmes que l'on sera capable de réaliser sur des processeurs quantiques». ■

S. B.

S. Bravyi et al., *Science*, vol. 362, pp. 308-311, 2018

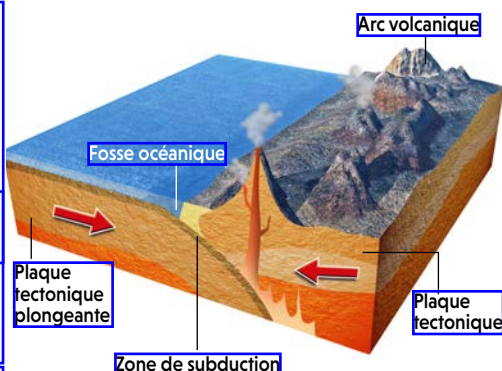
GÉOSCIENCES

L'EAU DE LA SUBDUCTION

Dans une zone de subduction, l'une des plaques tectoniques en collision plonge lentement dans le manteau. Ces plaques étant riches en eau, il est clair qu'elles sont à l'origine de l'apport d'eau dans les roches mantelliques. Mais les volumes de fluide impliqués sont mal connus.

Chen Cai et ses collègues, de l'université Washington de Saint-Louis, aux États-Unis, ont estimé la quantité d'eau qui est emportée vers l'intérieur de la planète dans la zone de subduction de la fosse des Mariannes (où se rencontrent la plaque tectonique Pacifique et la plaque tectonique des Philippines).

Les chercheurs ont utilisé une méthode d'imagerie qui exploite les ondes sismiques. Grâce à un réseau de 19 sismomètres répartis sur le fond de l'océan et de 7 stations sismologiques installées sur les îles proches de la fosse, ils ont analysé la propagation des ondes sismiques de 380 séismes survenus plus ou moins loin de la fosse des Mariannes. Ils ont ainsi pu estimer la



Lorsque deux plaques tectoniques se rencontrent, la plus dense s'enfonce dans le manteau et y apporte de l'eau.

teneur en eau de la roche jusqu'à des profondeurs de plusieurs dizaines de kilomètres dans la région de cette fosse. Ils concluent que 3 milliards de tonnes d'eau par an sont enfouies, soit quatre fois plus qu'on ne le pensait. Les conséquences, sans doute notables, sur les modèles du cycle de l'eau et de nombreux phénomènes géologiques tels que le volcanisme sont à étudier. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

C. Cai et al., *Nature*, vol. 563, pp. 389-392, 2018

EN BREF

COALESCENCES DE TROUS NOIRS : QUATRE DE PLUS !

Après une nouvelle analyse des données de 2016 et 2017 recueillies par leurs interféromètres géants aux États-Unis et en Italie, les membres de la collaboration *Ligo/Virgo* ont identifié quatre nouvelles détections d'ondes gravitationnelles. Le catalogue contient désormais onze événements, dont un est dû à la coalescence de deux étoiles à neutrons. Les dix autres correspondent à la fusion de deux trous noirs. Ces chocs titanesques ont fait vibrer l'espace-temps sous la forme d'ondes parvenues jusqu'à nous. Les interféromètres *Ligo* et *Virgo*, en cours de travaux d'amélioration, se remettront à écouter l'Univers au début de 2019. La moisson sera, à n'en pas douter, exceptionnelle.

cité

sciences
et industrie

l'année 2018 en sciences

rétro-actu

samedi 12 janvier
— à 14h30

et

Retour sur les événements scientifiques qui ont marqué l'année 2018.

Une rétrospective en images illustrant les découvertes de l'année, qui ont fait bouger les lignes des connaissances ou qui ont ouvert des voies à des applications inédites. Un décryptage des découvertes majeures de l'année par des chercheurs et des journalistes, pour en comprendre la portée scientifique et analyser leur impact médiatique.

Il sera notamment question de l'introduction accidentelle en France d'un ver plat géant, nouvelle menace pour la biodiversité des sols, ainsi que des dernières avancées dans les domaines de l'astronomie, de la santé ou encore des technologies.

Une rencontre proposée par le magazine *Science Actualités* et les Conférences d'Universcience en collaboration avec les étudiants du master Journalisme culture et communication scientifiques de l'université Paris Diderot.

AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENCE**

EVOLUTION

SANS DENTS NI FANONS

Si les baleines bleues ont des fanons (lames cornées qui garnissent la mâchoire supérieure) pour filtrer l'eau et attraper leurs proies, leurs ancêtres lointains avaient des dents. Dès lors, comment les fanons sont-ils apparus? Une hypothèse est que des ancêtres intermédiaires auraient eu à la fois des dents et des fanons. Carlos Peredo, de l'université George-Mason, aux États-Unis, et ses collègues ont une autre proposition.

Ces chercheurs ont étudié un fossile de baleine vieux de 33 millions d'années et d'un nouveau genre, *Maiabalaena*. Cet animal n'aurait eu ni dents ni fanons. Carlos Peredo et ses collègues suggèrent donc que les baleines auraient perdu leurs dents avant l'apparition des fanons. Mais alors, comment se nourrissait *Maiabalaena*? Par aspiration, supposent les chercheurs. ■

S.B.

C. Peredo et al., *Current Biology*, vol. 28, pp. 1-9, 2018

ETHOLOGIE

UN PROCESSUS CULTUREL CHEZ LA DROSOPHILE



Dans les expériences réalisées, une femelle choisit librement entre des mâles peints en vert (comme ici) ou en rose. D'autres femelles observent la copulation et copieront le choix effectué.

CHIMIE

UN REVÊTEMENT QUI RAFRAÎCHIT

La climatisation des bâtiments représenterait 10% de la consommation électrique mondiale. Face à ce souci économique et écologique, une solution serait d'utiliser des matériaux passifs qui réfléchissent la lumière du soleil et rayonnent dans l'infrarouge, de quoi réémettre plus d'énergie qu'ils n'en absorbent et ainsi avoir une température réduite par rapport à l'air ambiant.

Les revêtements réfrigérants actuels sont chers et fragiles. D'autres, sous forme de polymères contenant des pigments et appliqués comme une peinture, sont peu efficaces. Mais Jyotirmoy Mandal, de l'université Columbia, aux États-Unis, et ses collègues ont eu l'idée de leur retirer les pigments, à l'aide d'un solvant. Les pores vides ainsi obtenus modifient les propriétés optiques des polymères, qui réémettent alors efficacement le rayonnement: suivant les conditions atmosphériques, les chercheurs obtiennent une diminution de 4 à 6 °C de la température du matériau par rapport à l'air ambiant. ■

MARTIN TIANO

J. Mandal et al., *Science*, vol. 362, pp. 315-319, 2018

L'espèce humaine est foncièrement culturelle, mais elle n'est pas la seule à présenter de tels traits. Ce phénomène a été observé chez quelques oiseaux et quelques mammifères. De façon générale, la culture est définie comme un ensemble de traits et de comportements qui se transmettent par imitation, sous la forme d'un apprentissage social, et qui ne sont imputables ni à des variations génétiques ni à des conditions environnementales. La drosophile femelle est connue pour copier les préférences sexuelles de ses congénères après les avoir observées s'accoupler. Mais s'agit-il d'un trait culturel? Sabine Nöbel et Étienne Danchin, de l'université de Toulouse, et leurs collègues ont montré que c'est très probablement le cas.

Les chercheurs ont réalisé diverses expériences où, de façon générale, des drosophiles femelles choisissaient librement entre des mâles marqués de vert ou de rose, tandis que d'autres femelles observaient le choix opéré. Ils ont ainsi constaté que le comportement des femelles observatrices présente un aspect culturel: ces mouches tendaient à reproduire le choix de partenaire (rose ou vert) effectué par la majorité des femelles observées, ce qui est une forme de conformisme culturel.

Sabine Nöbel et ses collègues ont ensuite étudié comment ce trait de préférence sexuelle perdurait le long de chaînes de transmission où les observatrices deviennent ensuite les démonstratrices. Ils ont montré que le trait de préférence sexuelle pouvait se maintenir sur huit pas de transmission, mais s'estompait pour des raisons statistiques: la probabilité que plus de la moitié d'un groupe de démonstratrices dans l'expérience (six drosophiles) fasse une «erreur de choix» est relativement élevée. L'équipe a réalisé une simulation numérique qui s'accorde avec les observations et qui montre que la préférence sexuelle acquise perdure longtemps quand la taille du groupe atteint plusieurs dizaines d'individus. ■

S.B.

E. Danchin et al., *Science*, vol. 362, pp. 1025-1030, 2018

EN IMAGE

LES PLUS ANCIENNES PEINTURES SONT À BORNÉO

Les plus anciennes peintures figuratives de l'humanité jamais trouvées se trouvent à Bornéo : sur cette île, la grotte de Lubang Jeriji Saléh contient des œuvres d'au moins 40 000 ans. Avec plusieurs collègues indonésiens et australiens, l'archéologue québécois Maxime Aubert et son équipe de l'université Griffith, en Australie, viennent en effet d'attribuer cet âge à la représentation d'un gros animal dans des tons rouge-orange (*ci-contre*). Les chercheurs y sont parvenus en utilisant l'horloge uranium-thorium (le rapport isotopique thorium/uranium fournit une mesure du temps). La datation est d'autant plus sûre qu'il s'agit de celle de la calcite recouvrant en partie la peinture pariétale : elle fournit donc une valeur minimale de l'âge de l'œuvre.

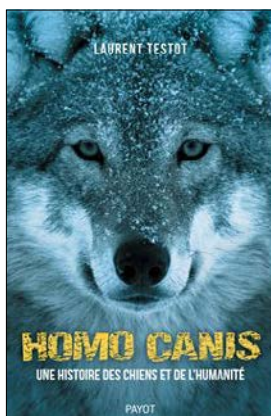
Il semble ainsi que l'art rupestre de Bornéo se soit développé à peu près à la même période que l'art figuratif d'Europe du Paléolithique supérieur, qui passait jusqu'à il y a peu pour unique. Cette unicité a en effet été remise en cause en 2014 : dans une étude précédente, l'équipe de Maxime Aubert avait prouvé que dans une grotte de l'île Sulawesi (Célèbes), voisine de Bornéo, des mains réalisées au pochoir (en soufflant une poudre sur une main posée sur la paroi) dataient de 40 000 ans.

On est désormais certain qu'une autre grande province de l'art pariétal en grotte a existé en Indonésie il y a environ 50 000-40 000 ans. Lors de cette période, le niveau de l'océan mondial était plus bas de quelque 80 mètres. Une partie de l'Indonésie comprenant Bornéo faisait alors partie de l'extrémité orientale de l'Eurasie, de sorte que son art pariétal – un comportement moderne en termes cognitifs – peut être associé à la pénétration de vagues successives d'*Homo sapiens* venus coloniser cette partie de l'Eurasie. ■

P.S.

M. Aubert et al., *Nature*, en ligne le 7 novembre 2018





INFORMATIQUE

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE OU L'ENJEU DU SIÈCLE

Éric Sadin

L'Échappée, 2018
304 pages, 18 euros

L'IA – c'est-à-dire l'intelligence artificielle – recouvre désormais l'ensemble des réalités que l'on rassemblait auparavant sous le concept de technique. En effet, rien n'échappe plus aux algorithmes, ni à l'industrie des données. C'est ce qui pousse Éric Sadin à présenter l'IA comme une techno-idéologie et à s'inspirer, pour le titre de son livre, de *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, de Jacques Ellul (1954).

Selon lui, l'IA nous fait entrer dans l'âge anthropologique de la technique en modélisant nos facultés cognitives pour mieux les dépasser, en assignant aux machines de satisfaire notre bien-être et de nous dévoiler toute vérité. Cette « émergence d'une *alètheia* [vérité] algorithmique » confirme, à sa façon, un diagnostic de Heidegger: la cybernétique a pris la place de la philosophie. Éric Sadin considère que nous sommes en train de réaliser le Léviathan décrit par Hobbes: un monde réglé comme une machine intégrale, « arrangée d'après le nombre » (Pythagore), une société régie par des signaux, qui nous dispense de toute volonté politique.

Il ne cède pourtant pas au défaitisme: « L'humain est susceptible de faire grincer la machine » et de résister aux automatismes. Le transhumanisme est moins à redouter que le consentement à une « humanité maternée, couvée, téléguidée depuis des serveurs ». Ce n'est pas une société de contrôle que nous laissons se développer, mais plutôt un univers offert à une emprise sans fin ni auteur. On ne viendra pas à bout de cet assujettissement par de la régulation, comme le voudrait la Cnil, qui n'a pas d'autre objectif qu'une mesquine défense de la vie privée. La résistance à laquelle Éric Sadin en appelle exige une « éthique de l'action », une expérimentation plurielle, animée d'un esprit de convivialité et d'entraide.

JEAN-MICHEL BESNIER

SORBONNE UNIVERSITÉ

ÉTHOLOGIE-ÉCOLOGIE

LA CIGOGNE BLANCHE

Marc Duquet

Delachaux & Niestlé, 2018
240 pages, 28 euros

L'originalité de cet ouvrage sur la biologie, l'écologie et l'éthologie de la cigogne blanche tient à l'utilisation d'informations provenant à la fois de sources récentes et d'observations et anecdotes relatées par des ornithologues amateurs. On y apprend par exemple que les cigognes sont plus fidèles à leur nid qu'à leur partenaire, et que leur régime alimentaire est beaucoup plus éclectique qu'on ne le croyait jusqu'à présent.

La dimension internationale, fondée sur les connaissances relatives aux zones de reproduction et d'hivernage de cette espèce, est l'un des atouts de l'ouvrage. L'auteur présente les deux axes de migration empruntés par les cigognes blanches, connus par le baguage des oiseaux et qui sont désormais validés par l'utilisation de balises GPS. Le voyage de migration reste périlleux pour les cigognes, surtout pour les jeunes qui effectuent pour la première fois leur migration vers le Sud. La répartition européenne de l'espèce est décrite de façon très précise en tenant compte des variations périodiques des effectifs des derniers comptages, et cela en fonction des différentes sous-populations accompagnées de cartes et de graphiques. Les différents programmes de réintroduction et les menaces contemporaines qui persistent sur l'espèce sont aussi abordés. De nombreuses photos de cigognes prises dans différents pays lors de leur migration ou de leur reproduction illustrent de façon agréable le texte. Ainsi, cette monographie s'adresse à un vaste public curieux d'élargir ses connaissances sur ce magnifique oiseau mythique.

SYLVIE MASSEMIN

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

HOMO CANIS, UNE HISTOIRE DES CHIENS ET DE L'HUMANITÉ

Laurent Testot

Payot, 2018

368 pages, 22 euros

L'auteur propose ici un point de vue surprenant consistant à lier l'histoire de l'homme à celle du chien. Les connaissances sur l'origine de notre espèce et celle du « meilleur ami de l'homme » ont beaucoup progressé ces dernières années, de sorte qu'il est apparu que l'histoire humaine et celle du chien sont étroitement liées. Nous pouvons désormais répondre à de vieilles questions qui apparaissaient sans solution à Charles Darwin ou à Konrad Lorenz : de quelle espèce sauvage dérive le chien ? Comment a-t-il été créé par nos ancêtres ? Quand ? Comment s'est déroulée cette histoire commune ?

Pour répondre, Laurent Testot fait parler les différents canidés : loup, renard et douze races de chiens présentent ainsi à tour de rôle leur point de vue... Une méthode amusante, qui rend le livre facile à lire malgré la profusion d'informations et d'anecdotes. Le résultat est un ouvrage de vulgarisation efficace, mais qui ne se prend pas au sérieux. Pour autant, il se situe dans la lignée des synthèses ambitieuses englobant l'ensemble des connaissances actuelles, comme celles de Yuval Harari (*Sapiens*) ou encore de Jared Diamond (*Effondrement*). Son originalité est de le faire avec humour à travers le chien, notre compagnon depuis bien plus longtemps que ne le sont les autres animaux domestiques.

PIERRE JOUVENTIN

ÉTHOLOGUE ÉMÉRITE AU CNRS

LA DRÔLE DE SCIENCE DES HUMAINS EN GUERRE

Mary Roach

Belin, 2018

320 pages, 23 euros

L'humour de l'« écrivaine scientifique la plus marrante des États-Unis » (sic) est vite lassant, mais son livre a néanmoins de l'intérêt. L'auteure a enquêté pour savoir non pas comment l'armée américaine tue ses ennemis (les recherches sur les armes sont résolument absentes du livre), mais comment elle limite les dégâts dans ses rangs. Les interventions au Moyen-Orient sont la principale source des expériences rapportées. L'auteure n'a pas reculé devant les horreurs, assistant à des exercices de transplantation d'organes sur des cadavres, ou décrivant en détail les blessures subies par les soldats et les exploits des chirurgiens qui reconstituent ce qui peut l'être.

Le livre fourmille de reportages concrets, pas tous aussi terrifiants que ceux-là. Par exemple, il montre combien habiller des soldats est difficile. Il faut répondre à un tas d'exigences opposées. Pas de velcro, dont le bruit peut attirer l'attention. Les fermetures Éclair risquent de s'enrayer si le soldat a rampé dans du sable. Les boutons font mal s'il reste longtemps coincé dans une position où il appuie dessus. Il faut des tissus qui résistent à toutes sortes d'agressions – eau, feu, kérosène, abrasions, lavages répétés – et ne soient pas trop inconfortables. Leur couleur doit être propice au camouflage, mais sans absorber la chaleur du soleil du Moyen-Orient. Etc.

Sans état d'âme, Mary Roach décrit la recherche militaire comme elle en décrirait une autre. Préparer la guerre demande une rigueur et une inventivité toutes scientifiques. Et – comme en sciences ! – sont parfois explorées des pistes bizarres. Ainsi, la recherche (vaine jusqu'à présent...) d'une bombe puante capable de déstabiliser un état-major ennemi.

DIDIER NORDON

ESSAYISTE



PLANÈTES, AUX CONFINES DE NOTRE SYSTÈME SOLAIRE

Thorsten Dambeck

Glénat, 2018

192 pages, 35 euros

Chercheur indépendant et journaliste scientifique, l'auteur a suivi de près l'exploration du Système solaire. Outre ses huit planètes, il nous présente ici les petits corps et autres satellites remarquables à partir des résultats récents de la recherche. Les images sont belles, mais surtout commentées avec pertinence. Dans l'ensemble, ce beau livre, préfacé par Hubert Reeves, permet une promenade instructive dans l'ensemble du Système solaire, dans notre nid cosmique en quelque sorte.

MÉDITATIONS SUR LA PHYSIQUE

Cyril Verdet

CNRS Éditions, 2018

288 pages, 25 euros

Chercheur associé au laboratoire Syrte de l'Observatoire de Paris et professeur de physique au lycée Stanislas, l'auteur se livre ici à d'intéressantes réflexions sur les deux physiques : la physique empirique, qui « décrit aussi fidèlement que possible » et la physique théorique, dans laquelle, par la raison, on tente de formuler « la règle à laquelle tous les phénomènes sans exception sont censés se soumettre ». Plus ancrée dans le passé de la « philosophie naturelle » que dans son présent, sa pensée d'une remarquable clarté s'attache, en six étapes – l'abstraction, la mesure, la conservation, la loi, l'ordre déductif et la théorie – à caractériser la démarche du physicien.

PIONNIERS ET AVENTURIERS DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Raphaëlle Javet et Raphaël Domjan

Favre, 2018

136 pages, 24 euros

Les auteurs de ce livre font un point historique sur les voitures, les navires et les avions solaires. Conçu comme un catalogue illustré par des photographies des engins, leur livre aurait pu devenir ennuyeux si leur sujet n'était si passionnant. De petits textes bien envoyés expliquent les caractéristiques essentielles des appareils qui se sont succédé depuis que des pionniers – souvent suisses ces dernières années – travaillent à promouvoir la mobilité solaire.

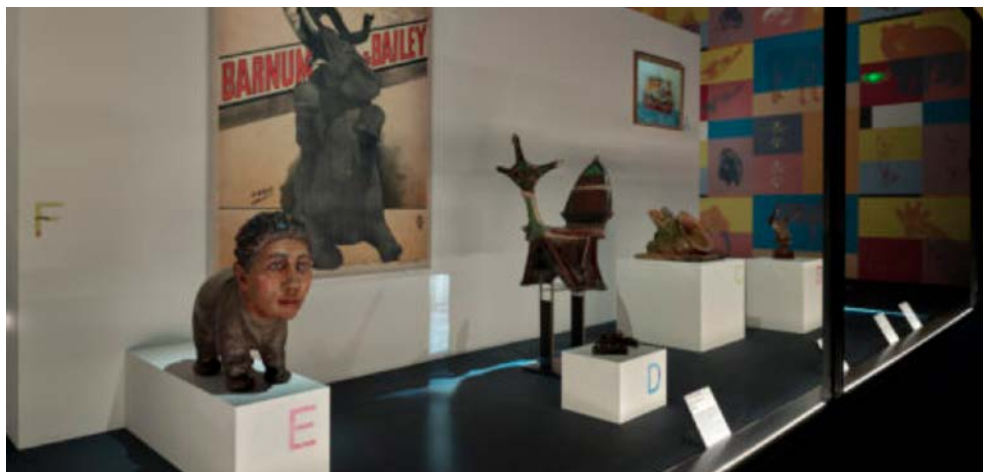
MARSEILLE

JUSQU'AU 4 MARS 2019

Mucem

www.mucem.org

Les animaux de A à Z



Depuis près d'un an, le Mucem consacre un nouvel espace à la présentation de ses propres collections, et cela prend la forme d'un thème dont 26 facettes sont montrées, de A à Z. Autrement dit, chaque lettre de l'alphabet est illustrée avec un ou plusieurs objets provenant des collections et des fonds d'archives du musée. Après l'amour, qui a inauguré la série, c'est le tour des animaux, qui occupent depuis toujours une grande place dans la vie et l'imaginaire des humains. Cette exposition explore le rapport entre homme et animal dans les sociétés

d'Europe et de Méditerranée en l'illustrant par une sélection de représentations ou d'objets servant à exploiter, piéger ou protéger les animaux. Par exemple, la lettre G est illustrée par l'image de la girafe offerte en 1827 au roi Charles X, cet animal exotique ayant suscité une immense curiosité et la mode de produits qu'on qualifierait aujourd'hui de dérivés. Autre exemple: un piège à rat pour la lettre R, ce rongeur étant un vieil ennemi de nos garde-manger ou silos. Un animal rusé, qui parvient à déjouer les pièges malgré leur ingéniosité. ■

PARIS

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020

Cité des sciences et de l'industrie

www.cite-sciences.fr

Corps et sport



Une première partie de l'exposition propose des ateliers sportifs (gestes techniques, football, escalade...) où le visiteur teste sa réactivité, son endurance, sa précision, ses capacités de coordination ou de concentration... La seconde partie, moins interactive, aborde le sport comme phénomène social, la question des performances, l'aspect matériel, les liens avec la santé. ■

JUBLAINS (MAYENNE)

JUSQU'AU 22 AVRIL 2019

Musée archéologique départemental de Jublains

www.museedejublains.fr

Bronzorama



Atravers de nombreux objets en bronze, des pièces de vaisselle en terre cuite, des parures en coquillages, etc., cette exposition offre un regard sur l'âge du Bronze (2300 à 800 avant notre ère) de la région Ouest (Pays de la Loire, Bretagne, Normandie). Un panorama sur l'habitat, les pratiques alimentaires, la vie quotidienne, l'artisanat, les pratiques funéraires. ■

ET AUSSI

Jeudi 10 janvier, 20 h 30

Espace des Sciences, Les Champs Libres, Rennes
www.espace-sciences.org

VOYAGE AU PAYS DE LA LUMIÈRE

Le physicien Daniel Hennequin explique, expériences à l'appui, ce qu'est la lumière, par quels mécanismes elle est produite, ses usages...

Du 16 au 20 janvier

Théâtre La Reine Blanche, Paris

www.reineblanche.com

RÊVES ET MOTIFS

À l'aide de ses techniques optiques, la compagnie Les Rémouleurs met en images des extraits de *Récoltes et Semailles*, texte foisonnant et étrange écrit par le grand mathématicien qu'était Alexandre Grothendieck.

Vendredi 18 janvier, 20 h 30

La Méridienne, Lunéville
lameridienne-luneville.fr

PARA DOXA

Fruit d'une collaboration entre le chorégraphe David Rolland et trois scientifiques, cette pièce entre danse, théâtre et mathématiques met en scène des problèmes de décision et des paradoxes.

Mercredi 23 janvier, 18 h 30

BnF (bibliothèque François-Mitterrand), Paris
www.bnf.fr

DE NEWTON AUX COURANTS DE GRAVITÉ

Dans la série « Un texte, un mathématicien », une conférence d'Emmanuel Trélat qui nous fait voyager de la pomme de Newton jusqu'aux découvertes récentes sur des trajets quasi gratuits pour sondes spatiales.

Lundi 28 janvier, 15 h

Jardin des sciences, Palais universitaire, Strasbourg
jardin-sciences.unistra.fr

LA LUMIÈRE BLEUE

Conférence de Virginie Laurent-Gydé, de l'Institut des neurosciences cellulaires et intégratives, sur la lumière « bleue » à laquelle nous sommes de plus en plus exposés et sur ses effets.

BORDEAUX

JUSQU'AU 3 MARS 2019

Musée des arts décoratifs et du design
www.madd-bordeaux.fr

Phénomènes



Un duo de jeunes designers, Marion Pinaffo et Raphaël Pluinage, a préparé pour cette exposition un ensemble d'expériences interactives par lesquelles le public peut se confronter à des phénomènes scientifiques et techniques mis en œuvre dans les objets du quotidien. Ces dispositifs mêlant design, technologie et pédagogie n'utilisent que des ingrédients simples tels que billes, carton, encres conductrices, gouttes d'eau, etc. Par exemple, le visiteur pourra manipuler trois des six jeux proposés par *Papier Machine n° 0* (photo ci-dessus), des assemblages en papier prédécoupé qui produisent des sons et qui permettent d'explorer le fonctionnement de capteurs électroniques. Des dispositifs ludiques pour démythifier une partie de la technologie moderne qui nous entoure. ■

SION (SUISSE)

JUSQU'AU 3 MARS 2019

Le Pénitencier
www.musees-valais.ch



Mémoire de glace

Avec le réchauffement climatique, les glaciers libèrent des vestiges piégés depuis des lustres et en très bon état de conservation. Une nouvelle discipline scientifique est ainsi née, l'archéologie glaciaire. Est présentée ici une sélection d'objets datant parfois de trois millénaires, qui racontent comment les hommes étaient équipés pour affronter la montagne, comment et où ils circulaient, quelles ressources naturelles (minérales ou animales) ils y exploitaient, comment ils sollicitaient la protection divine... ■

SORTIES DE TERRAIN

Vendredi 4 janvier, 17 h 30
Planétarium Ludiver,
La Hague
Tél. 02 33 78 13 80

LE CIEL AU TÉLESCOPE

Deux heures en compagnie d'animateurs pour observer cratères lunaires, planètes ou étoiles avec un télescope de 60 centimètres de diamètre.

Vendredi 11 janvier, 16 h
Réserve du Val d'Allier,
Auvergne
www.lpo-auvergne.org
Tél. 07 77 82 88 30

GRUES CENDRÉES DANS L'ALLIER

Deux heures de balade à la tombée de la nuit pour admirer le retour des grues cendrées à leur dortoir.

Samedi 12 janvier, 9 h
Balloy (Seine-et-Marne)
www.anvl.fr

OISEAUX DE LA BASSÉE

Une journée (avec déplacements en voiture) à la découverte des oiseaux de plusieurs sites de la Bassée, riche milieu naturel de la vallée de la Seine.

Samedi 19 janvier, 10 h
Biotopia,
Notre-Dame-de-Monts (85)
RAIE'COLTE

Participez à la science et au programme CapOeRa de suivi des poissons cartilagineux en récoltant, le temps d'une matinée, les capsules d'œufs de raie échouées sur le littoral.

Dimanche 20 janvier, 14 h 30
Yves (Charente-Maritime)
Tél. 05 46 56 41 76

LE MARAIS D'YVES

Une promenade de deux heures à la rencontre de la faune (les échassiers notamment) et de la flore de ce site composé de milieux très divers.

Samedi 26 janvier, 14 h 30
Ambon (Morbihan)
Tél. 06 25 58 17 39

LE MARAIS D'AMBON

Une sortie de deux heures et demie à la découverte de ce marais du Parc naturel du golfe du Morbihan et de sa faune ornithologique.

PARIS

JUSQU'AU 7 JUILLET 2019

Musée des Arts et Métiers
www.arts-et-metiers.net

Sous la surface, les maths

Comment crée-t-on avec réalisme les paysages et personnages qui peuplent les jeux vidéo et autres dessins animés? Les mathématiques des surfaces sont pour ce faire un outil essentiel, auquel sont introduits les visiteurs de cette exposition (conçue par l'institut Henri-Poincaré à l'occasion du centenaire de la disparition du géomètre Gaston Darboux).

Au fil de leur parcours, les visiteurs pourront expérimenter les surfaces sous différentes formes. Des manipulations interactives leur permettront de comprendre les fractales en dessinant des arbres, de modéliser des objets



mous, d'engendrer diverses surfaces à l'aide de mouvements simples, de se familiariser avec les différentes représentations de la Terre. Et par des manipulations physiques, ils pourront appréhender des notions mathématiques telles que la normale à une surface, les lignes géodésiques (chemins les plus courts entre points d'une surface), les surfaces réglées (surfaces décrites par des familles de droites)... ■



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LIMITER LA VITESSE DES VOITURES AUTONOMES?

Respect strict ou transgression exceptionnelle si une situation le justifie, il faut choisir les règles sur la limite de vitesse à programmer dans ces véhicules.



De nombreux projets de voitures autonomes (ici celle du constructeur Mercedes-Benz) sont en cours. Le choix des règles à intégrer dans le logiciel de ces véhicules est loin d'être évident.

Le logiciel d'une voiture autonome comprend un algorithme qui calcule le plus court chemin allant d'un point à un autre. Il est similaire à celui que nous utilisons déjà sur nos GPS, à la différence près que ses indications sont directement communiquées aux commandes de la voiture, sans l'intermédiaire d'un conducteur humain.

Il est naturel de penser que, dans un tel cas, l'algorithme respecte, par construction, les limitations de vitesse. Ainsi, sur une route limitée à 80 kilomètres par heure, il ne peut jamais dépasser cette vitesse. Le code de la route serait même partiellement inutile, puisque le code de l'algorithme exprimerait la même chose, dans un autre langage.

Mais ce raisonnement repose sur une confusion entre deux significations du verbe «pouvoir»: sa signification aléthique, selon laquelle rouler à plus de 80 kilomètres par heure est matériellement impossible, et sa signification déontique, selon laquelle cela est interdit. De nombreuses langues utilisent même des verbes

différents pour exprimer ces deux modalités: *can* et *may* en anglais, *können* et *dürfen* en allemand... Il y a, en effet, une grande différence entre l'impossibilité de franchir un mur en béton et l'interdiction de franchir une ligne blanche: si, sur une route déserte, un conducteur voit soudain un piéton, dix mètres devant son véhicule, il franchira sans doute une ligne blanche

L'application rigide des limites de vitesse se justifie par le fait qu'elle réduit le nombre d'accidents

pour l'éviter, même si cela est interdit; mais il ne franchira pas un mur en béton, car cela est impossible. Le propre d'une interdiction est donc qu'il est possible de la transgresser. Et que cela est même autorisé, voire obligatoire, face à un tel dilemme. L'interdiction: «Tu ne tueras point» est

plus impérative que: «Tu ne franchiras point la ligne blanche».

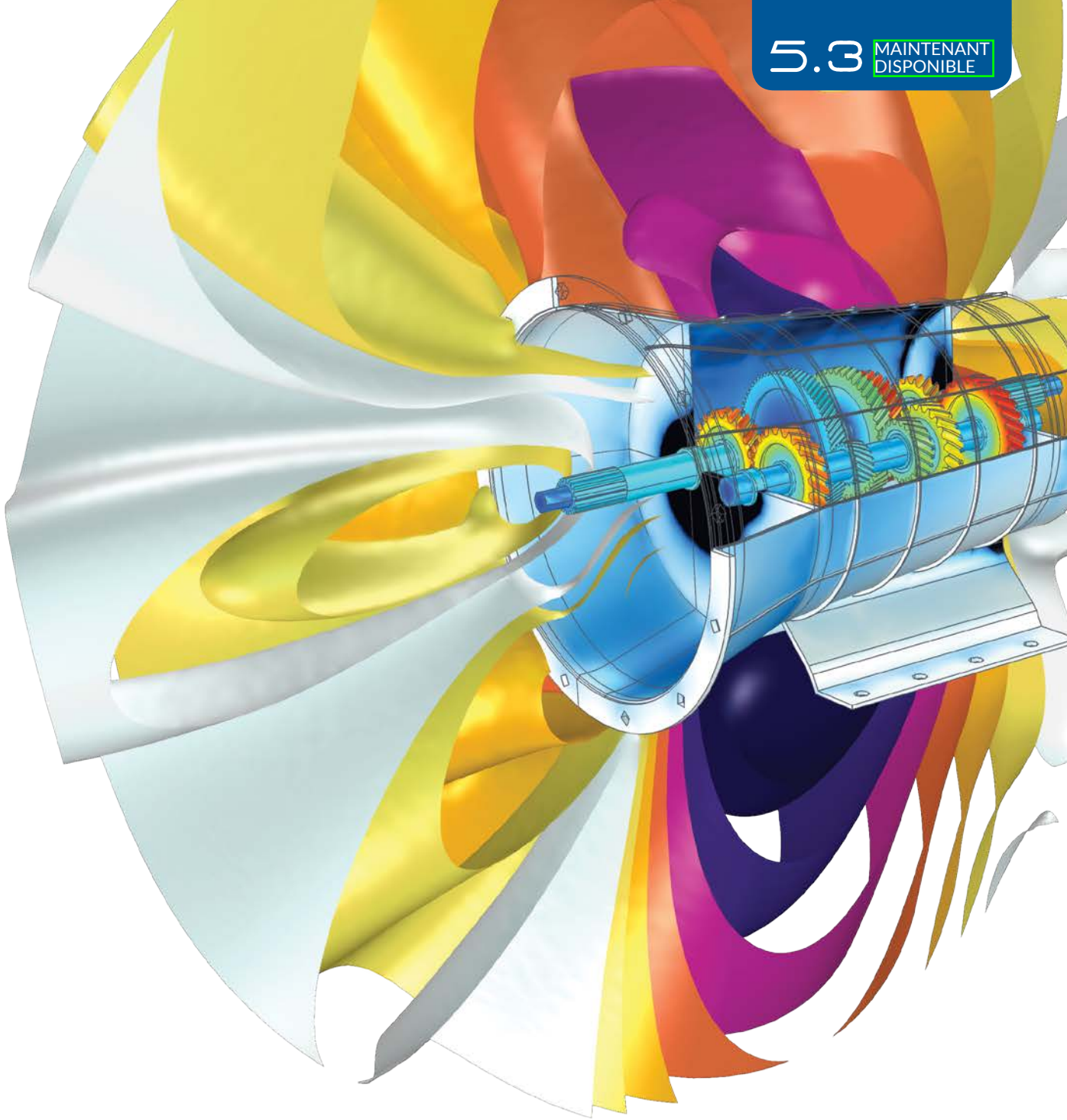
Dépasser la vitesse limite devrait-il donc, pour un véhicule autonome, être impossible ou interdit? Deux points de vue s'opposent ici.

Pour certains, dépasser la vitesse limite devrait être interdit, mais non impossible, de même que les voitures actuelles ne sont pas bridées de façon à respecter les limitations de vitesse, même si certaines alertent leur conducteur quand il les transgresse. Ainsi, il est facile d'imaginer des situations où un véhicule autonome devrait être autorisé à transgresser une limitation de vitesse: pour fuir un incendie qui se propage à 81 kilomètres par heure, pour accompagner un patient aux urgences, ou une future mère à la maternité, voire pour que son passager arrive à l'heure à un examen. Ainsi, les passagers d'un véhicule autonome déclareraient à l'algorithme de commande une situation de dilemme, dans laquelle ils estiment que les limitations de vitesse devraient être transgressées. Faute de quoi, l'algorithme, transformant une modalité déontique en une modalité aléthique, appliquerait le code de la route de façon trop intransigeante.

Pour d'autres, au contraire, cette application rigide se justifie par le fait qu'elle réduit statistiquement le nombre d'accidents: ces situations d'urgence sont finalement assez rares, alors que de nombreux accidents sont provoqués par des transgressions, plus ou moins justifiées, des limitations de vitesse.

Une résolution possible de cette controverse est d'imaginer un code de la route plus complexe que celui que nous connaissons, dans lequel la vitesse limite serait différente pour un véhicule conduisant un malade aux urgences, un candidat à un examen ou un spectateur au cinéma. Cette complexité permettrait de différencier ces situations sans, pour autant, nécessiter une transgression du code de la route. Elle rendrait ainsi l'application intransigeante de ce code moins insupportable. ■

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



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

comsol.fr/products



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

REPOUSSER LE DERNIER MOMENT

Des situations sociales telles que les fêtes, les rentes viagères ou des changements de loi sur les successions ont de surprenants effets sur le taux de mortalité.



Dans une de ses célèbres fables, *La Mort et le Bûcheron*, Jean de la Fontaine narre le destin d'un pauvre bougre harassé de fatigue et à qui la vie n'apporte aucun plaisir. Pourquoi dans ces conditions continuer à vivre? se demande-t-il. N'en pouvant plus, «Il appelle la Mort. Elle vient sans tarder», écrit l'auteur français. Lorsqu'elle lui demande pourquoi il l'a appelée, il se ravise, la peur au ventre: «C'est, dit-il, afin de m'aider / À recharger ce bois; tu ne tarderas guère.» La Fontaine en conclut: «Plutôt souffrir que mourir, / C'est la devise des hommes.»

Nous n'avons ni le pouvoir d'appeler la mort ni celui de la révoquer aussi facilement, mais il y a peut-être quelque chose de vrai dans cette fable, et d'assez mystérieux. Le premier à avoir posé le problème est le sociologue américain David Phillips, qui s'est beaucoup intéressé au phénomène de la mort et en particulier à la question de savoir s'il était possible de repousser le moment de son décès. Il a analysé des registres de

mortalité imposants afin de traiter statistiquement la question.

La vie sociale est encadrée par toutes sortes de rituels dont la célébration peut paraître désirable, comme certaines fêtes nationales. Est-il possible que certains individus se «retiennent» de mourir juste avant ces dates? Pour répondre à cette question, David Phillips s'est intéressé à une fête chinoise qui, ayant l'avantage de

Le taux de mortalité chute juste avant la fête et augmente immédiatement après

changer de date chaque année, garantissait que les résultats obtenus ne soient pas des artefacts liés à la saisonnalité. L'analyse qu'il publia en 1990, fondée sur les registres de décès chinois, aboutit à des résultats spectaculaires: le taux de mortalité chute de plus d'un tiers avant

la fête et augmente de la même façon immédiatement après!

Deux autres sociologues, Ellen Idler et Stanislav Kasl, ont confirmé ces résultats en 1992 en les élargissant aux autres fêtes religieuses. Ils constatèrent sur des milliers de cas que si les juifs ne se gênent pas pour mourir durant les fêtes chrétiennes et réciproquement, les uns et les autres se retiennent de le faire, statistiquement, trente jours avant leurs fêtes confessionnelles.

Il existe d'autres situations sociales où l'on n'a pas intérêt à mourir. Par exemple si l'on a contracté une rente viagère. Nous avons tous en tête le film de Pierre Tchernia où le personnage joué par Michel Serrault déjoue tous les pronostics en devenant centenaire après avoir vendu sa maison en viager. Or cette situation n'est pas si fictionnelle qu'il y paraît: deux économistes américains, Tomas Philipson et le Prix Nobel Gary Becker, ont montré en 1998 que ceux ayant choisi la rente viagère avaient plus de chances de s'accrocher à l'existence.

Aussi bizarres que soient ces résultats, ils sont confirmés par d'autres études. Par exemple, deux chercheurs australiens, Joshua Gans et Andrew Leigh, économistes eux aussi, ont montré en 2006 que lorsque les droits de succession ont été abolis dans leur pays (c'était en 1979), on a enregistré un nombre anormalement bas de décès dans la semaine qui a précédé cette mesure, alors que les décès sont repartis à la hausse immédiatement après – comme si les individus avaient, pour mourir, attendu de le faire dans de meilleures conditions fiscales.

Difficile de dire si tous ces résultats révèlent des forces mystérieuses de la volonté ou seulement le fait que l'on prend spécialement soin de soi dans des conditions particulières. Les plus pessimistes diront que ce n'est que reculer pour mieux sauter, car tout ce qui est disparaîtra un jour, comme cette chronique. D'ailleurs, ceux qui pensent ainsi ne prennent-ils pas le risque de nous quitter avant les autres? ■

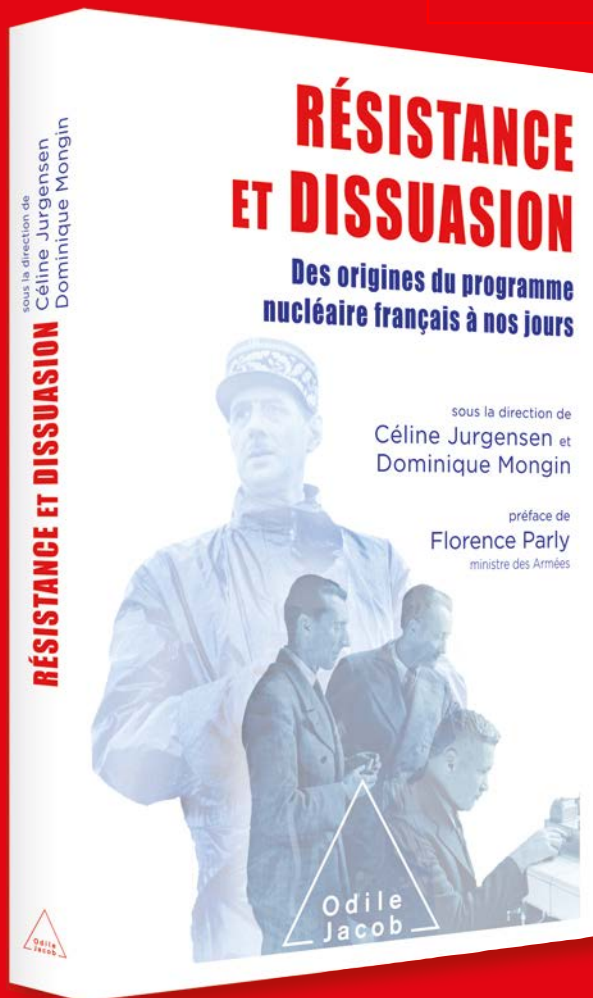
GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

2 ouvrages de référence sur la **Dissuasion nucléaire**

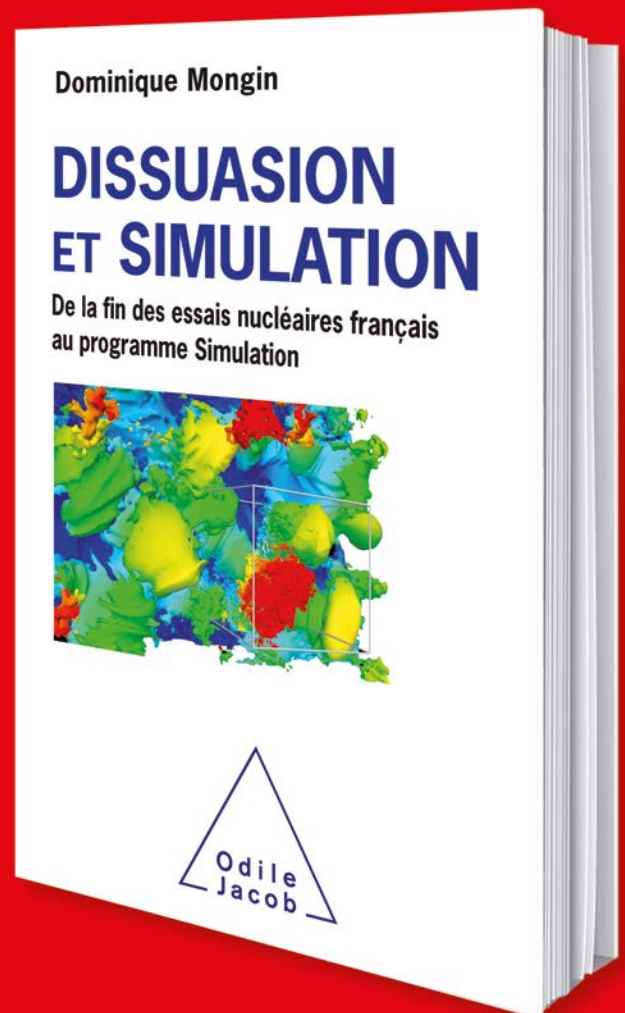
L'Histoire

La Doctrine

La Science



400 p.
22€



320 p.
27€

**Odile
Jacob**

L'ESSENTIEL

> La plupart des physiciens pensent que la physique quantique et la relativité générale ne peuvent être conciliées que dans le contexte d'une théorie quantique de la gravitation.

> Les principales pistes que sont la théorie des cordes ou la gravitation quantique à boucles n'ont pas encore obtenu de résultats satisfaisants.

> Une autre voie est celle de la « gravitation semi-classique », où cette force resterait de nature classique. Des modèles développés récemment montrent que cette approche peut fonctionner.

> Des expériences pour tester directement la nature quantique ou classique de la gravitation pourraient voir le jour d'ici à une dizaine d'années.

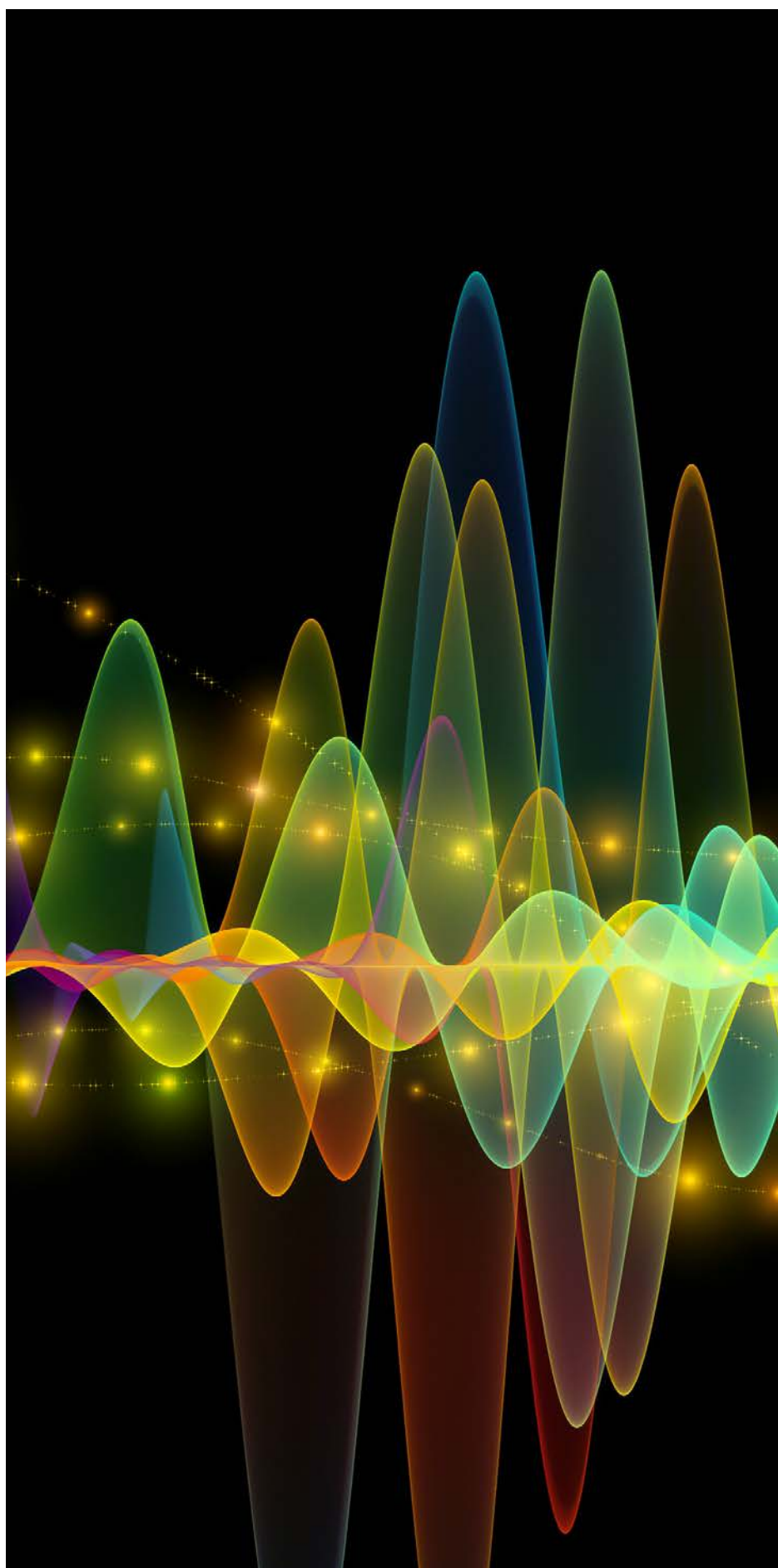
L'AUTEUR



ANTOINE TILLOY
physicien à l'institut Max-Planck d'optique
quantique, près de Munich, en Allemagne

Pour Carlo Rovelli, chercheur au centre de physique théorique de Luminy, près de Marseille, « le problème de la gravitation quantique n'est rien de moins que le problème de trouver la nouvelle description cohérente du monde, qui amènerait enfin la révolution scientifique du xx^e siècle à sa conclusion. »

La révolution en question est celle de l'avènement de deux théories : la physique quantique, qui porte notamment sur le comportement des particules à l'échelle microscopique, et la relativité générale, qui décrit l'espace-temps et la gravitation. Ces deux théories ont bouleversé notre vision du monde, des plus petites aux plus grandes échelles. Mais les réunir dans « une nouvelle description cohérente », comme l'évoque Carlo Rovelli, est encore hors de portée. Jusqu'ici, toutes les tentatives visant à élaborer une théorie quantique de la gravitation, ou « gravité quantique » pour faire court, ont été décevantes. Mais cette synthèse est-elle vraiment



Et si la gravité n'était pas quantique?

Les tentatives d'échafauder une théorie quantique de la gravitation ont jusqu'ici échoué. Des physiciens explorent une autre voie, où cette force resterait de nature classique. Mais cela implique de repenser les fondements de la physique quantique.

Dans certaines interprétations de la physique quantique, dites de réduction dynamique, les particules se matérialisent lors de « flashes ». Dans de tels modèles, on peut inclure la gravitation sans avoir besoin d'en établir une formulation quantique.

COMMENT INTERPRÉTER LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

La théorie quantique est constituée d'un ensemble de lois et de règles qui permettent de calculer avec succès et précision les probabilités d'obtenir différents résultats lors d'une expérience. Mais ce formalisme mathématique ne dit rien de la réalité sous-jacente. En particulier quelle est la nature, et la signification, de la fonction d'onde, l'un des ingrédients clés de la physique quantique ? Et de façon plus générale, que se passe-t-il dans

le monde quantique ? Qu'est-ce qui est réel ? Toute théorie de la gravitation de type semi-classique, qui concilierait la force gravitationnelle classique et les autres interactions fondamentales quantiques, exige de répondre à ces questions afin que l'on puisse définir une notion concrète de masse gravitationnelle. Il existe des dizaines d'interprétations de la physique quantique, plus ou moins radicales, dont je présente ici les plus abouties. **A. T.**

INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE



L'interprétation de Copenhague est l'approche historique, influencée par le physicien danois Niels Bohr et ses collaborateurs. Elle existe en de nombreuses variantes qui donnent à la fonction d'onde des statuts subtilement différents. Aujourd'hui, on identifie en général cette interprétation à celle figurant dans les manuels actuels, même si la version modernisée s'éloigne en partie des idées parfois confuses de Bohr. Dans cette interprétation dite orthodoxe, la question même du statut de la fonction d'onde n'est pas pertinente, car considérée

comme métaphysique plutôt que physique. Inspirée par la philosophie positiviste, l'approche orthodoxe considère en effet plus généralement qu'une théorie physique doit se limiter à prédire la statistique de résultats expérimentaux, toute autre discussion étant au mieux superflue, au pire hérétique. En 1989, le physicien américain David Mermin, critique de cette philosophie, a résumé l'interprétation de Copenhague en un slogan frustrant destiné aux étudiants : *shut up and calculate* (« tais-toi et calcule »).

Mais s'interdire par principe ou par modestie de poser la question de la réalité

ne la fait pas disparaître pour autant. Exaltés par le succès de leur approche minimaliste, certains fondateurs de la physique quantique ont fait l'erreur de la croire inévitable.

Le physicien allemand Werner Heisenberg, par exemple, écrivait en 1958 : « L'idée d'un monde extérieur objectif, dont les constituants élémentaires existent de la même façon que les pierres et les arbres existent, indépendamment de l'observation, est impossible. » Heureusement, les physiciens n'ont jamais prouvé une telle chose ! La question reste aujourd'hui plus que jamais ouverte.

MONDES MULTIPLES



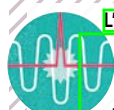
Proposée par l'Américain Hugh Everett en 1956, l'interprétation des mondes multiples a pour objectif de donner une description du réel sans rien ajouter à la fonction d'onde ni modifier sa dynamique. La fonction d'onde décrit naïvement une réalité superposée, qui s'étend des particules microscopiques aux objets macroscopiques et même à l'Univers dans sa globalité. L'interprétation des mondes multiples décrète que les superpositions d'états sont réelles et que ces états existent simultanément : par exemple, à chaque mesure, un univers où le chat de Schrödinger est vivant se sépare d'un autre où il est mort. La théorie de la décohérence, développée par Dieter Zeh en 1970, explique que cette approche est en principe compatible avec l'impression de vivre dans un univers unique : une fois que deux univers deviennent suffisamment différents, ils n'interagissent plus entre eux, et évoluent de façon parallèle, invisibles l'un pour l'autre.

MÉCANIQUE BOHMIENNE



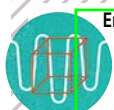
Introduite par le physicien américain David Bohm en 1952, mais ébauchée par le Français Louis de Broglie dès 1927, la mécanique bohmienne (ou théorie de l'onde pilote) est une reconstruction plutôt qu'une interprétation de la physique quantique. Dans cette théorie, la réalité est constituée de particules ponctuelles qui sont guidées de façon déterministe par la fonction d'onde, ou onde pilote, qui a un statut de loi fondamentale. Ce qui constitue la réalité est simple (des particules), et la subtilité quantique est tout entière dans la dynamique de l'onde pilote. En 1993, les physiciens Detlef Dürr, Sheldon Goldstein et Nino Zanghi ont établi que les prédictions empiriques de la mécanique bohmienne étaient identiques à celles de l'approche orthodoxe.

MODELES DE REDUCTION DYNAMIQUE



L'objectif des modèles de réduction dynamique est de modifier légèrement la dynamique de la fonction d'onde pour détruire les superpositions macroscopiques et ainsi forcer la réalité à choisir un unique univers, évitant ainsi l'explosion ontologique de l'interprétation des mondes multiples d'Everett. Le prix à payer est une infime modification des prédictions de la physique quantique, à ce jour non observée. Dans le modèle de Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, proposé en 1986, cette modification prend la forme d'un effondrement de la fonction d'onde, rare, aléatoire et spontané en un point de l'espace. La réduction de la fonction d'onde, qui se faisait uniquement lors de la mesure d'un observateur dans l'interprétation de Copenhague, se fait ici de façon naturelle. Dans cette approche, on peut postuler que ces instants de réduction, nommés *flashes*, où la particule se matérialise, sont la seule réalité.

QBISME



En 2001, Carlton Caves, Christopher Fuchs et Rüdiger Schack ont proposé le « QBisme » (ou bayésianisme quantique) : la fonction d'onde est un outil mathématique qui encode les croyances réévaluables de l'observateur sur le système quantique étudié. Une telle vision purement statistique de la fonction d'onde, bien que séduisante, est incompatible avec la non-localité quantique. Le prix à payer pour éviter la contradiction est de renoncer à la notion de réalité objective, même pour les résultats de mesures, qui deviennent eux aussi subjectifs, dépendants de l'observateur. Pour Christopher Fuchs, la réalité est participative : créée par et pour l'observateur. Anticipé par David Mermin, le QBisme demande d'accepter que « la Lune n'est démontrablement pas là quand on ne la regarde pas ».

➤ nécessaire? Et si oui, la gravité quantique est-elle la seule façon d'y parvenir? Des physiciens dont je fais partie explorent une autre piste qui consiste à concilier relativité générale et physique quantique sans pour autant imposer une formulation quantique de la gravitation.

Pour y parvenir, ils sont amenés à repenser les fondements de la physique quantique. Cette théorie a été développée à partir des années 1920 et 1930 sous l'impulsion de Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac et d'autres. Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, elle a conduit au développement de la théorie quantique des champs, qui intègre dans un ensemble cohérent le «modèle standard de la physique des particules», trois des quatre interactions fondamentales. Celles-ci sont l'électromagnétisme, qui agit entre photons et particules dotées d'une charge électrique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des protons et des neutrons (les composants du noyau atomique), et l'interaction faible, qui se manifeste notamment dans la radioactivité bêta.

La quatrième interaction fondamentale, la gravitation, est décrite par une théorie très différente de la physique quantique: la relativité générale, introduite en 1915 par Albert Einstein. Dans cette théorie, la matière et l'espace-temps interagissent pour donner ce

dans les expériences menées dans les accélérateurs de particules.

DES THÉORIES INCOMPATIBLES

Ainsi, à son niveau le plus fondamental, l'Univers semble régi par deux mécaniques distinctes, deux ensembles de lois *a priori* incompatibles tant les notions et objets de ces théories sont différents. Dans leurs domaines d'application respectifs, ces deux théories sont d'une efficacité redoutable. Mais relativité générale et physique quantique ne semblent pas pouvoir être utilisées simultanément, en tout cas pas sans modification. Que se passe-t-il, par exemple, dans une situation où les effets dus à la physique quantique sont importants, mais où la force gravitationnelle domine? La réponse simple est que l'on ne sait pas. Le problème n'est pas que l'on ne sait pas effectuer les calculs, mais que l'on n'a même pas de cadre théorique approprié.

Les situations où il faudrait utiliser à la fois la physique quantique et la relativité générale sont rares dans la nature. Nous n'avons donc pas de résultats expérimentaux pour nous indiquer ce qui s'y passe. Cette situation est due au fait que la gravitation est une force extrêmement faible, qui ne domine les trois autres que pour les objets massifs et étendus. Or les effets quantiques tendent, eux, à se brouiller lorsque la taille des objets considérés augmente.

Néanmoins, au moins deux situations motivent la recherche d'une théorie quantique de la gravitation. Sans une telle théorie, il semble impossible de savoir ce qui s'est passé au début de l'Univers, au moment du Big Bang, ou au centre des trous noirs, ces objets d'une extrême densité qui déforment l'espace-temps au point que même la lumière ne peut s'en échapper. Dans ces deux cas, où la gravitation est très forte, la relativité générale prédit l'existence de singularités, c'est-à-dire des grandeurs physiques infinies. C'est là un signal clair que cette théorie est insuffisante, à elle seule, pour décrire ces situations: les effets de la physique quantique y sont importants et doivent être pris en compte.

Dès lors, comment construire une théorie globale combinant physique quantique et relativité générale? Une première piste naturelle est la «quantification canonique». Cette technique formelle permet de produire une version quantique d'une théorie physique dont on ne connaît qu'une formulation «classique». En 1927, le physicien anglais Paul Dirac a introduit et appliqué avec succès cette méthode à l'électromagnétisme. Avec ses raffinements successifs, cette approche a conduit à l'intégration des trois interactions non gravitationnelles au sein du modèle standard.

En 1967, les Américains John Wheeler et Bryce DeWitt ont tenté d'obtenir une formulation quantique de la gravitation en utilisant la quantification canonique. Mais cette approche

A priori, sans une théorie quantique de la gravité, il semble impossible de savoir ce qui s'est passé au début de l'Univers

que l'on perçoit comme la force gravitationnelle: la matière (et l'énergie) courbe l'espace-temps et son mouvement est, en retour, déterminé par le «relief» de l'espace-temps.

La relativité générale est utile dans les situations où la gravitation domine, c'est-à-dire principalement en astrophysique et en cosmologie. La physique quantique, plus précisément le modèle standard, s'applique plutôt dans des situations où la gravitation est négligeable en comparaison des autres forces, ce qui est le cas

fonctionnait mal et entraînait des difficultés techniques et conceptuelles qui semblaient insurmontables. Notamment, la théorie que l'on obtient par quantification canonique est « non renormalisable », c'est-à-dire qu'elle fait apparaître dans les calculs des infinis dont on ne peut se débarrasser. De façon plus philosophique, et en admettant que ce point technique soit contournable, des notions *a priori* triviales comme le temps ou la causalité deviennent difficiles à comprendre et même à définir.

DES CORDES ET DES BOUCLES

Ce premier échec a motivé des approches plus exotiques et élaborées, comme la « gravité quantique à boucles », qui est un raffinement de l'approche canonique et dont Carlo Rovelli est l'un des auteurs, ou la théorie des cordes, qui s'en éloigne plus radicalement. Cette dernière, qui est probablement la voie la plus explorée et la plus aboutie, fait l'objet d'études intenses depuis environ quarante ans. Dans cette approche, les objets fondamentaux ne sont pas des particules ponctuelles, mais de minuscules cordes vibrantes. Parmi les nombreux aspects intéressants de cette théorie, un résultat prometteur du point de vue d'une gravité quantique est qu'elle décrit un mode de vibration (d'une corde) qui serait associé au graviton, la particule médiatrice de la force gravitationnelle lorsqu'on suppose que celle-ci est de nature quantique.

Cependant, si la théorie des cordes contourne la non-renormalisabilité de l'approche canonique, ses succès se paient par une complexité mathématique extrême, au point que l'on ne dispose pas d'une définition mathématique générale de la théorie. En pratique, les physiciens ont un ensemble d'approximations dont on conjecture qu'elles sont les limites d'une théorie sous-jacente (la théorie M) qui reste à expliciter. La théorie des cordes souffre aussi d'un excès de flexibilité. Un choix judicieux de conditions initiales permettrait d'obtenir à peu près n'importe quelle prédiction, ce qui met en question la réfutabilité de la théorie. Ces difficultés justifient *a minima* que l'on s'intéresse à d'autres pistes.

Après tout, si parvenir à une formulation quantique de la gravitation se révèle aussi difficile, c'est peut-être parce que la gravité diffère, par nature, des autres forces. Aucun principe n'interdit *a priori* de construire une théorie globale faisant cohabiter la relativité générale et la physique quantique en gardant une formulation classique de la gravité. L'idée est moins esthétique – la gravitation serait alors fondamentalement différente des autres interactions – mais l'Univers fait peu de cas de nos canons de beauté. On parle alors de gravité semi-classique (« semi » car la gravité n'est pas quantique, tandis que les autres forces le sont).

À quelles contraintes une telle théorie est-elle soumise ? Elle doit continuer à décrire la

La théorie des cordes est extrêmement complexe et souffre d'un excès de flexibilité

force gravitationnelle de la même façon que la relativité générale, mais avec une subtilité supplémentaire : la matière doit obéir par ailleurs aux lois de la physique quantique.

Comme on l'a déjà dit, la relativité générale décrit la gravitation comme le résultat d'une interaction dynamique entre matière et espace-temps : la courbure de l'espace-temps détermine le mouvement de la matière, tandis que, simultanément, la matière déforme le relief de l'espace-temps. Dans cette double dynamique, il est assez simple d'adapter les équations de la physique quantique pour prendre en compte une courbure donnée *a priori* : c'est la théorie quantique des champs en espace courbe, sur laquelle ont travaillé des chercheurs comme Bill Unruh, Stephen Hawking, Roger Penrose et Robert Wald à partir des années 1970.

Bien que les calculs ne soient pas faciles, ce formalisme a été utilisé dans divers cas limites, pour calculer par exemple les propriétés d'atomes froids dans le champ gravitationnel terrestre ou pour prédire l'existence d'un rayonnement extrêmement faible (pas encore détecté) émis par les trous noirs, le rayonnement dit de Hawking.

À l'inverse, nous n'avons aucune idée de la façon dont la matière décrite par la physique quantique courbe en retour l'espace-temps. Comprendre cette influence demande de se poser des questions très fondamentales sur certains concepts : qu'est-ce que la masse gravitationnelle en physique quantique ? Comment se crée un champ gravitationnel ? Etc. Là-dessus, la physique quantique, dans son approche usuelle, est muette.

En revanche, cette théorie permet de faire des prédictions précises. Les informations disponibles sur un système quantique sont contenues dans un objet mathématique, la fonction d'onde du système. Dans les années 1920, les physiciens ont énoncé un ensemble de règles simples qui, à partir de la fonction d'onde, permettent de calculer et prévoir les résultats d'une mesure (ou plutôt leur probabilité) lors d'une expérience.

Mais cette approche ne dévoile rien d'une réalité qui serait sous-jacente aux résultats des mesures expérimentales. La physique quantique est une sorte de boîte noire. Dans cette vision dite de l'école de Copenhague, héritée de Niels Bohr, l'un des pères de la théorie quantique, on ne cherche pas à en dire plus. Le statut même de la fonction d'onde – objet réel ou simple outil de calcul? – n'est lui-même pas clair. Or si l'on veut savoir comment la matière quantique courbe l'espace-temps, on ne peut se contenter de ce mutisme. Nous devons spéculer sur la nature tangible sous-jacente aux prédictions quantiques et explorer d'autres interprétations de la physique quantique que celle de l'école de Copenhague (voir l'encadré page 30).

SUPERPOSITIONS D'ÉTATS

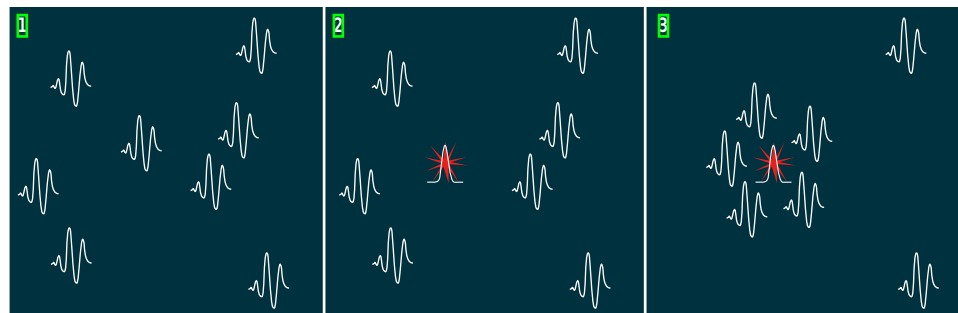
Une spécificité de la physique quantique, que l'on n'observe pas dans le monde classique, est le principe de superposition. Tant que la propriété d'un objet quantique (sa position, sa vitesse, son spin, etc.) n'a pas été mesurée, l'objet peut exister dans une superposition d'états correspondant à des valeurs différentes

de cette propriété. Du point de vue du formalisme, l'état quantique d'une particule peut, par exemple, mettre en jeu plusieurs positions différentes simultanément.

Schrödinger a illustré cette idée par un exemple macroscopique qu'il considérait absurde: un chat enfermé dans une boîte munie d'un dispositif déclenché par un événement aléatoire (la désintégration d'un atome), ce qui tuerait l'animal. Tant que la boîte reste fermée et son intérieur inaccessible à l'observateur, l'atome peut être dans une superposition de deux états, «désintégré» et «non désintégré». Mais cela impliquerait que le chat serait dans une superposition de deux états classiquement contradictoires, «mort» et «vivant». Cependant, il est impossible d'observer directement les superpositions. Elles sont détruites lorsqu'on réalise une mesure – en ouvrant la boîte, la superposition disparaît (on parle de réduction de la fonction d'onde) et le chat est alors soit vivant, soit mort.

On ignore donc si une superposition d'états existe vraiment où s'il s'agit seulement d'un outil intermédiaire de calcul. En 1962, le Danois Christian Møller et le Belge Léon Rosenfeld ont

RÉDUCTION DYNAMIQUE PAR DES « FLASHS »



Les superpositions quantiques sont difficiles à interpréter pour une particule élémentaire. Mais la situation est encore plus gênante à l'échelle macroscopique. Comme l'a souligné Erwin Schrödinger avec son chat à la fois mort et vivant, les superpositions ne sont a priori pas confinées au microscopique. Si l'on applique l'équation de Schrödinger à des objets de la vie courante, constitués d'un grand nombre de particules, on obtient toujours des superpositions : la fonction d'onde du chat dans la boîte comprend aussi bien des configurations dans lesquelles il est mort que d'autres où il est vivant.

Les modèles de réduction dynamique visent à résoudre

ce problème en détruisant de façon aléatoire les superpositions macroscopiques, tout en conservant (à peu près) les superpositions microscopiques nécessaires pour expliquer les résultats expérimentaux.

En 1986, les Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (GRW), proposent que la fonction d'onde d'une particule obéisse à l'équation de Schrödinger la plupart du temps, mais subisse parfois un « flash ». Avec une probabilité très faible, de sorte que l'événement se produit en moyenne moins de une fois par milliard d'années, la particule se matérialise en un endroit bien précis, nommé flash, autour duquel se resserre aussitôt

la fonction d'onde. Cette réduction brutale, qui modifie l'équation de Schrödinger, a un impact minime sur la dynamique microscopique, car une particule ne « flashe » presque jamais. En revanche, un objet macroscopique tel qu'un chat, contenant de l'ordre de 10^{23} atomes, voit chaque seconde des milliards de ses particules élémentaires se matérialiser en un flash. Une réalité « non superposée » émerge ainsi comme un tableau pointilliste.

S'il résout le problème des superpositions, le modèle GRW est ad hoc et ajoute de nouveaux paramètres fondamentaux à la physique (tels que la fréquence à laquelle les particules flashent) sans intuition quant à leur origine. Peu de physiciens pensent que GRW est la solution aux

problèmes conceptuels de la physique quantique. Les expériences cherchant à mesurer la stabilité de superpositions dans des systèmes de plus en plus gros devraient le réfuter bientôt.

Ce modèle permet néanmoins d'explorer des moyens d'introduire une force gravitationnelle classique. Dans le modèle développé par Antoine Tilloy et Lajos Diósi en 2015, au sein d'un système de particules (1, représentées de façon abusive chacune par une fonction d'onde, au lieu d'une fonction d'onde pour l'ensemble du système), une particule subit un flash (2, en rouge). Elle acquiert une masse et crée un champ gravitationnel qui attire les fonctions d'onde des autres particules (3).

proposé de supposer qu'une superposition d'états est une entité bien réelle et contribue donc à courber l'espace-temps (qui, lui, reste bien unique, sans superposition). Ils ont ainsi spéculé que l'énergie de tous les états composant la superposition courbe l'espace-temps. Mais cette proposition de Møller et Rosenfeld soulève des difficultés conceptuelles. Il existe plusieurs façons de les mettre en évidence. Celle que nous allons présenter n'est pas celle qui a été utilisée historiquement, mais elle est la plus simple et la plus générale.

UNE INTRICATION NON LOCALE

Pour comprendre l'argument, il faut remonter à un article d'Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen publié en 1935. Dans cet article, ces chercheurs ont considéré un système de deux particules dans un état superposé de la forme: «particule 1 immobile, particule 2 en mouvement» et «particule 1 en mouvement, particule 2 immobile». Cet état est dit intriqué, car les états individuels des deux particules sont intimement liés: la mesure de la vitesse de la particule 1 fixe instantanément l'état (immobile ou en mouvement) de la particule 2, même si elles sont très éloignées l'une de l'autre.

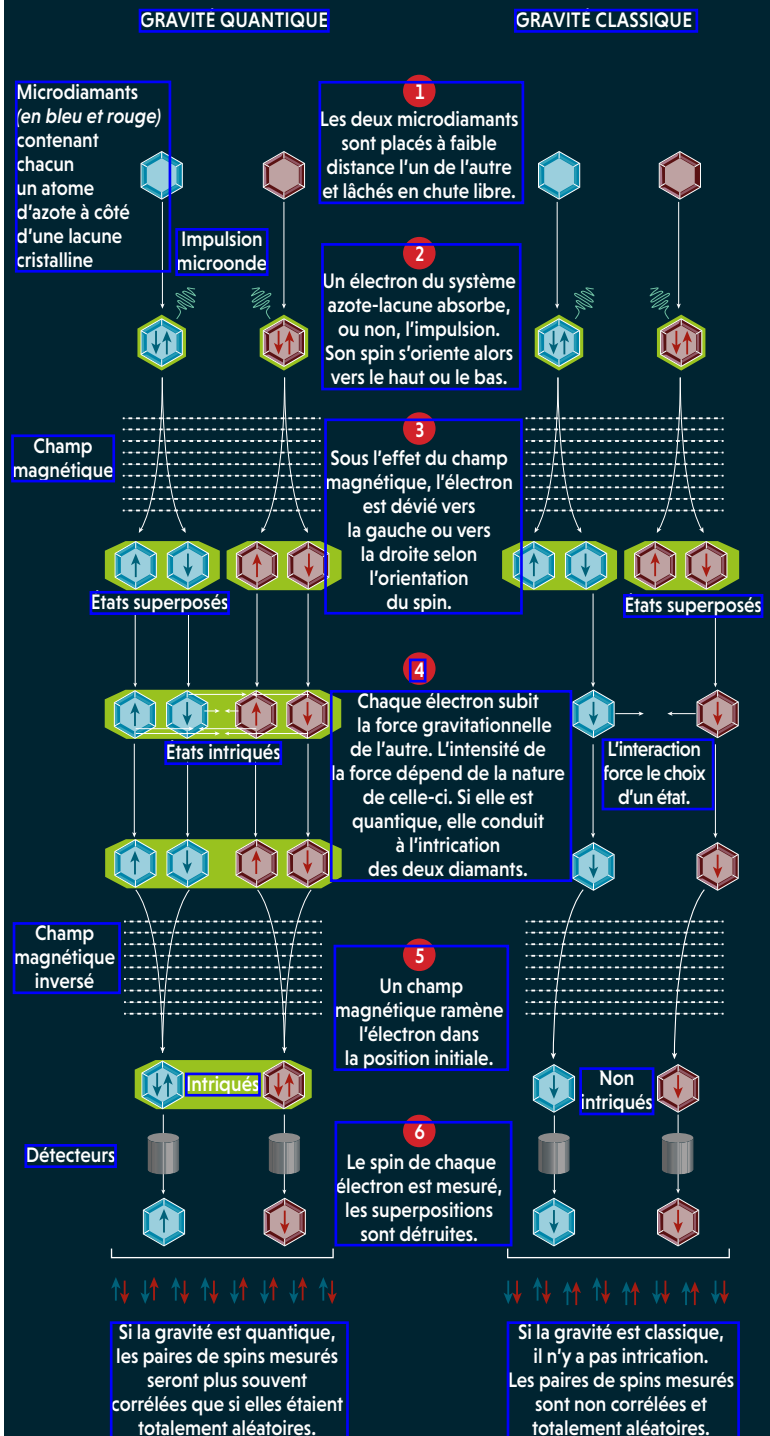
Cette situation semble en contradiction avec la relativité restreinte qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière: en effet, dans l'expérience de pensée ci-dessus, de l'information (l'état de la particule 1 ou 2) semble échangée instantanément entre les deux particules. Einstein et ses deux coauteurs en concluaient que la superposition initiale était un artefact de modélisation, et qu'il n'y avait en fait qu'une seule réalité, prédéterminée avant même la mesure. La superposition, présente dans le formalisme quantique, ne serait qu'une conséquence de notre ignorance. Il manquerait ainsi des variables (parfois dites cachées) qui spécifieraient de façon plus précise l'état des particules. Dès lors, le formalisme de la physique quantique serait incomplet car améliorable, manquant de spécifier un résultat pourtant prédéterminé.

Si, en revanche, les résultats ne sont pas déterminés avant la mesure, il faut admettre que la physique quantique implique l'existence d'interactions non locales, indépendantes de la distance séparant les particules et donc non contraintes par la relativité restreinte. Einstein jugeait cette solution inacceptable.

En 1964, au Cern, le physicien nord-irlandais John Stewart Bell a réexaminé l'expérience de pensée de 1935. Il a défini des inégalités (les inégalités de Bell) que doit vérifier toute théorie locale. Et comme la physique quantique, telle qu'elle est formulée, est non locale, les inégalités doivent être violées si cette théorie est correcte. Or cela a pu être testé expérimentalement. En 1982, Alain Aspect, de l'Institut d'optique, à

VERS UN TEST EXPÉRIMENTAL ?

Une nouvelle expérience a été proposée pour sonder le caractère quantique de la force gravitationnelle. Elle sera peut-être réalisable d'ici à quelques années. Elle repose sur deux microdiamants, mais chacun dans une superposition quantique de deux états. En rapprochant les deux diamants l'un de l'autre, la force de gravitation devrait intriquer ces états si cette force est de nature quantique. Si elle est fondamentalement classique, les chercheurs n'observeront pas de phénomène d'intrication.



Orsay, et son équipe ont constaté sur un système de photons intriqués que les inégalités de Bell étaient effectivement violées et donc que la nature suivait bien les prédictions quantiques et leur caractère non local.

Les conséquences de la non-localité sont-elles une menace pour la relativité restreinte? Bizarrement, en apparence seulement. Les équations de la physique quantique conspirent à maintenir la non-localité sous une forme bénigne: elle est inexploitable pour transmettre de l'information et reste donc compatible avec la relativité restreinte.

En revanche, si l'on utilise la méthode de Møller et Rosenfeld pour intégrer une force gravitationnelle classique à la physique quantique, la situation devient problématique. Cette approche brise la linéarité de l'équation de Schrödinger, équation fondamentale qui régit l'évolution temporelle de la fonction d'onde d'un système quantique. En 1989, Nicolas Gisin, physicien genevois, pionnier de l'étude de la non-localité quantique, fit remarquer que la non-linéarité a, de façon générale, une conséquence fatale: se propageant à d'autres éléments mathématiques de la théorie, elle est exploitable pour transmettre de l'information plus vite que la lumière. Cet argument a disqualifié la proposition de Møller et Rosenfeld ainsi que toutes les approches similaires.

La question devient alors: existe-t-il une façon de coupler un espace-temps classique à

La méthode de Møller et Rosenfeld entraîne des difficultés avec la relativité

de la matière quantique sans que la non-localité mette à mal les principes de la relativité restreinte? Existe-t-il des modifications de la physique quantique compatibles avec le théorème de Nicolas Gisin? Dès 1984, Nicolas Gisin lui-même avait construit un modèle rudimentaire modifiant la physique quantique sans briser la relativité restreinte, en ajoutant aux équations un terme fondamentalement aléatoire. Ce modèle préfigurait les modifications de la physique quantique dites d'*objective collapse* en anglais ou de «réduction dynamique».

Avant de chercher à les appliquer à la gravitation, les physiciens ont étudié les modèles de réduction dynamique pour résoudre un problème lié aux superpositions d'états. Dans l'exemple du chat de Schrödinger, la superposition d'états d'un atome se répercute sur un objet macroscopique, le chat, et jusque sur les instruments de mesure. Or, comme voulait le souligner Schrödinger, ce phénomène est problématique puisqu'on n'observe pas les effets des superpositions à l'échelle macroscopique. Les partisans de l'école de Copenhague écartaient cette difficulté en postulant que les instruments de mesure étaient de nature différente, intrinsèquement classique, et qu'ils réduisaient ainsi automatiquement les superpositions à leur contact. Mais cette distinction entre monde quantique et instruments de mesure classiques est arbitraire, les instruments étant eux-mêmes faits d'atomes.

SUPPRIMER LES SUPERPOSITIONS

À partir de la fin des années 1980, les physiciens ont exploré la possibilité que la physique quantique ne soit qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale, dans laquelle les superpositions à l'échelle macroscopique sont impossibles. Qu'elles soient réelles ou de purs artefacts du formalisme, les superpositions resteraient confinées au monde microscopique: les atomes conserveraient leur capacité à exister dans plusieurs états à la fois, mais le chat de Schrödinger serait contraint par les équations à être dans un état qui est soit la vie, soit la mort. L'idée est d'ajouter dans l'équation de Schrödinger des termes garantissant que les superpositions se réduisent à un état unique lorsque le système devient grand. Cependant, pour respecter le théorème de Gisin, la seule façon de modifier l'équation est d'ajouter des termes de nature aléatoire: en les choisissant judicieusement, les non-linéarités problématiques comme celles qui émergeaient dans le modèle de Møller et Rosenfeld se compensent et s'annulent. L'aléa permet de rétablir la linéarité de l'équation et élimine la possibilité de transmettre des signaux plus rapides que la lumière.

Les plus connus de ces modèles de réduction dynamique sont le modèle GRW (voir l'encadré page 33), du nom de ses auteurs, les Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, et le modèle DP, du physicien hongrois Lajos Diósi et du mathématicien anglais Roger Penrose.

Initialement, aucun de ces modèles n'incluait la force gravitationnelle; l'objectif était alors simplement de supprimer les superpositions. Ces tentatives ont aussi prouvé qu'il est possible de modifier l'équation de Schrödinger sans entrer en conflit avec le théorème de Gisin: il faut simplement ajouter la bonne quantité d'aléa.

Durant les vingt-cinq années qui ont suivi l'introduction de ces modèles de réduction >

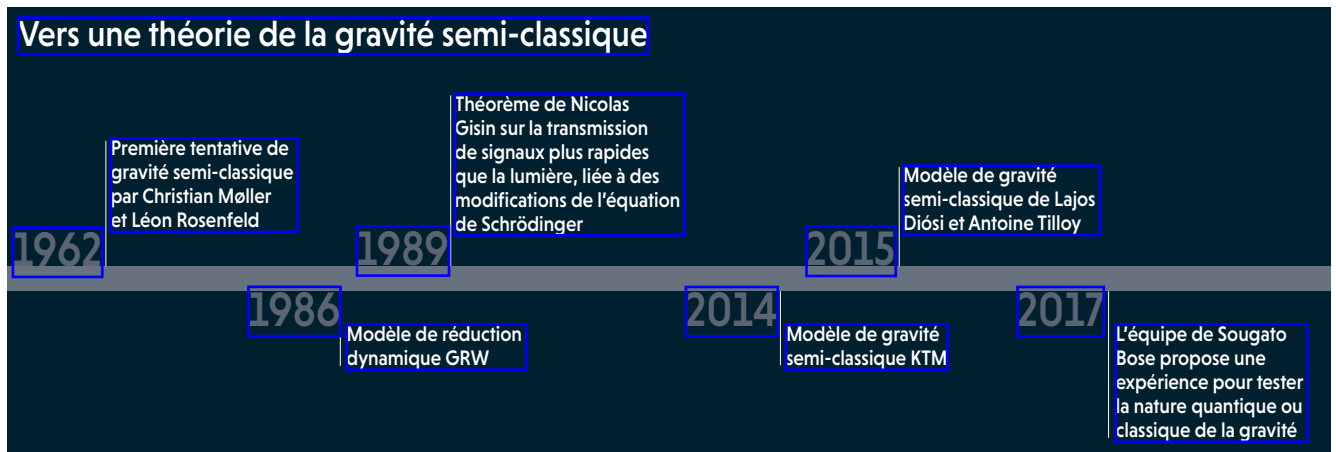
▶ dynamique, l'idée d'y inclure la gravitation est restée peu discutée. Les physiciens pensaient que les prédictions seraient de toute façon impossibles à tester expérimentalement. Mais vers 2010, les chercheurs ont envisagé la possibilité d'explorer le caractère quantique de la gravitation grâce à des expériences à basse énergie exploitant finement les superpositions quantiques.

Du côté théorique, la situation était embarrassante: on ne disposait pas de théorie de gravité semi-classique cohérente qui puisse être comparée aux résultats des expériences futures. En pratique, les théoriciens étaient

modèle ne fonctionnant que pour des vitesses faibles, ce qui est néanmoins suffisant pour traiter toutes les expériences de laboratoire à basse énergie.

Quelle est l'idée du modèle? Rappelons que la difficulté de la gravité semi-classique consiste à extraire de la physique quantique une grandeur que l'on peut définir comme la masse (ou l'énergie) servant de source à un champ gravitationnel classique (sans superposition d'états).

Dans l'approche standard, le seul objet dont on dispose est la fonction d'onde. Dans les approches de réduction dynamique comme le modèle GRW, l'évolution de la fonction



contraints d'utiliser l'approche (incohérente) de Møller et Rosenfeld en croisant les doigts pour que ses prédictions soient à peu près valables dans des situations simples. Faute de mieux, on se servait d'une théorie que l'on savait fautive pour estimer des ordres de grandeur et guider le choix des expériences futures.

En 2014, les physiciens Dvir Kafri et Jacob Taylor, de l'université du Maryland, avec Gerard Milburn, de l'université de Californie à Santa Barbara, ont développé un premier modèle simplifié de gravité semi-classique. Mais la force gravitationnelle qu'ils obtenaient dans leur modèle n'était pas réaliste, même dans le cas non relativiste où l'on considère des vitesses faibles: elle ne reproduisait pas l'expression newtonienne d'une force proportionnelle à l'inverse du carré de la distance. Cependant, par construction, le modèle est cohérent. Et s'il ne décrit pas une force réaliste, ce résultat est un grand pas en avant. Peut-on aller plus loin et reproduire la bonne force?

Au début de 2015, en exploitant la même intuition que Dvir Kafri et ses collègues et en la fusionnant avec les constructions historiques des modèles de réduction dynamique des années 1990, j'ai construit, avec Lajos Diósi, un modèle complet reproduisant la bonne force gravitationnelle (proportionnelle à l'inverse du carré de la distance). Notre

d'onde de chaque particule (dictée par l'équation de Schrödinger) est interrompue de façon aléatoire. C'est ce qu'on nomme un «flash», c'est-à-dire un point de l'espace-temps où la superposition est détruite. Le terme de «flash» a été choisi pour mettre en valeur l'aspect éphémère du phénomène (et n'a rien à voir avec une émission de lumière).

COMME UN FILM DE 24 IMAGES PAR SECONDE

Dans notre modèle, la particule devient réelle à l'instant et l'endroit précis du flash. Elle se matérialise et acquiert une masse (celle-ci est reliée à la masse usuelle de la particule, qu'il faut voir comme une sorte de moyenne entre les moments où la particule subit un flash et ceux, hors flash, où elle n'est pas matérialisée). Au moment du flash, la particule crée donc un champ gravitationnel. La particule attire alors vers elle la fonction d'onde du reste du système ou, dit de façon un peu abusive, toutes les autres particules du système. Puis une autre particule se matérialise par un flash et attire vers elle la fonction d'onde du reste, etc. Entre chaque flash, l'évolution quantique usuelle reprend le relais. La gravité se manifeste ainsi de façon saccadée.

Si cette dynamique semble en contradiction avec l'impression que nous avons d'une force

gravitationnelle continue, elle est compatible avec les contraintes expérimentales actuelles. Cela s'explique par la faiblesse de la gravitation. Entre deux particules élémentaires, cette force est bien trop petite pour être détectable. Elle n'est observable qu'avec des objets macroscopiques, et même une balle de golf, constituée

Un objet du quotidien d'environ 10^{23} atomes subirait des milliards de flashes par milliseconde

pourtant de plus de 10^{23} atomes, produit une force gravitationnelle à peine détectable.

Dans cette balle ou dans tout objet macroscopique, les milliards de flashes et d'à-coups gravitationnels qui apparaissent chaque milliseconde donnent aux observateurs l'impression d'un champ gravitationnel évoluant de façon douce et continue. Le phénomène est analogue à la persistance rétinienne, grâce à laquelle une succession de 24 images statiques par seconde nous fait apparaître un mouvement fluide et non saccadé.

Un tel modèle, où les flashes sont la source de la force gravitationnelle, présente un certain nombre de signatures expérimentales potentiellement détectables. Par exemple, chaque flash ajoute de l'énergie cinétique aux particules. Cette petite augmentation d'énergie serait observable sous la forme d'un réchauffement mesurable, par exemple, dans des condensats d'atomes ultrafroids.

Faut-il croire à ce modèle? Probablement pas: rappelons qu'il ne fonctionne que dans le régime non relativiste. Il sera intéressant de le réfuter par des expériences pour tester les limites de la physique quantique. Mais en développant ce modèle, notre objectif était surtout de fournir un contre-exemple à l'affirmation selon laquelle une théorie hybride, où la gravité serait classique, est impossible à construire. Disposer d'un modèle cohérent, même s'il est *in fine* réfuté, permet de prouver que la question de la quantification de la gravité est bien empirique et se tranchera par l'expérience.

Ce modèle peut aussi servir de point de départ pour construire de nombreuses

variantes où, par exemple, chaque flash a une certaine extension spatiale, ou subsiste au-delà de l'instant de son apparition. Cela modifie les prédictions quantitatives, qu'il sera intéressant de confronter avec les expériences. Cette flexibilité pourrait cependant devenir une faiblesse: si tout résultat expérimental est explicable *a posteriori* en changeant le modèle à la marge, l'approche globale perdra son caractère prédictif. Ainsi, alors que le problème initial était l'impossibilité apparente de construire un seul modèle de gravité semi-classique cohérent, on risque de se retrouver au contraire avec trop de solutions.

Une tout autre façon d'aborder le problème de la gravité classique ou quantique est de rechercher des signatures expérimentales qui permettraient de tester la pertinence de la gravité semi-classique indépendamment du modèle. En 2017, une équipe d'expérimentateurs et de théoriciens, menés par Sougato Bose, à l'University College de Londres, ont répondu précisément à ce défi. Ils ont proposé une expérience permettant de conclure quant au caractère quantique ou non de la gravitation.

Pour ce faire, ils exploient une différence qualitative entre toutes les approches semi-classiques cohérentes et une hypothétique théorie quantique. L'idée est d'intriquer une fonction d'onde *via* la force gravitationnelle (voir la figure page 34). Cela n'est possible que si cette force est de nature quantique. Si la force gravitationnelle n'est pas quantique, on n'observera pas d'intrication.

UNE RÉPONSE D'ICI À QUELQUES ANNÉES?

La difficulté de l'expérience de Bose est de trouver une configuration telle que toutes les autres forces, notamment la force de Casimir, liée aux fluctuations électromagnétiques du vide, sont bien négligeables devant la gravité. La surprise est que les avancées techniques requises sont assez raisonnables en termes de microfabrication, de contrôle quantique des systèmes... Des défis, certes, mais sans commune mesure avec celui d'un accélérateur de particules grand comme le Système solaire, qui semble indispensable pour détecter directement des gravitons.

Dans les années 1980, les physiciens pensaient que la nature quantique ou classique de la gravité était une question théorique. Elle sera peut-être expérimentale dans un futur proche. Le résultat le plus intéressant serait de découvrir que la gravité n'est pas quantique. Cela irait à contre-courant de ce que pensent la majorité des physiciens et des efforts consentis ces soixante dernières années. À l'inverse, si la gravité est quantique, une théorie de la gravité quantique n'en deviendra que plus indispensable. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Laloe, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, EDP Sciences (2^e éd.), 2018.

A. Tilloy, **Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes**, *Phys. Rev. D*, vol. 97(2), 021502, 2017.

S. Bose et al., **A spin entanglement witness for quantum gravity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. Ghirardi, **Collapse theories**, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), 2016.

N. Gisin, **Stochastic quantum dynamics and relativity**, *Helv. Phys. Acta*, vol. 62, pp. 363-371, 1989.

Le Ruapehu, un volcan sensible à la Lune

On sait que la Lune ne fait pas pousser les cheveux ni ne déclenche les naissances. Mais l'astre de la nuit agit sur les marées... et peut-être sur les volcans.



Le mont Ruapehu, un puissant volcan de l'île nord de la Nouvelle-Zélande, semble sensible à la Lune pendant ses phases prééruptives.

© Junk Asano - iStockphoto.com

L'ESSENTIEL

> Le suivi sismique du volcan néozélandais Ruapehu trahit une sensibilité aux cycles lunaires préalables aux éruptions phréatiques.

> La modélisation mécanique du volcan suggère que l'attraction gravitationnelle de la Lune suffit à moduler

les vibrations de la poche de gaz qui surmonte la colonne de magma.

> Si l'étude d'autres volcans – ceux pour lesquels il existe suffisamment de données sismiques – confirme cet effet, on aurait un moyen potentiel de surveiller les éruptions phréatiques.

L'AUTEUR



CORENTIN CAUDRON
volcanologue
à l'Institut des sciences
de la Terre, à Chambéry

Le 25 septembre 2007, le volcan néozélandais Ruapehu entre en éruption. Une colonne de vapeur et de cendres s'élève rapidement à plus de 4600 mètres au-dessus du lac de cratère. Des vibrations sismiques secouent les alentours pendant de longues minutes.

Deux lahars – des coulées de boue formées par l'éjection du lac de cratère et l'interaction de son eau avec la neige – se forment et deux alpinistes, réfugiés à proximité du sommet, sont blessés par des blocs projetés par l'éruption.

L'événement, heureusement, s'est produit durant la nuit et n'a pas fait davantage de dégâts. Comme souvent lors des éruptions phréatiques, aucun signal précurseur n'a pu être mis en évidence. Le volcan était sismiquement silencieux et le lac de cratère bleu turquoise – un formidable outil de surveillance, puisqu'il intègre les flux de chaleur et condense les gaz volcaniques – était particulièrement froid. Les très compétents volcanologues néozélandais nomment poétiquement ces éruptions des *blue-sky events*, c'est-à-dire des « événements surgis d'un ciel bleu » ; en d'autres termes : complètement inattendus. De fait, après avoir soigneusement réétudié les données, ils n'ont décelé ni hausse de température, ni séisme inhabituel, ni première irruption en surface pouvant être vus comme des prémices. Bref, aucun signal géophysique n'a annoncé l'éruption.

Pour autant, avec le géophysicien Tarsilo Girona, du Jet propulsion laboratory à la Nasa, en Californie, nous avons réexaminé la situation sous un autre angle et conçu l'espoir de déceler tout de même des signes précurseurs. Selon nous, c'est du côté du ciel que l'on pourrait trouver une solution... L'étude de l'influence gravitationnelle de la Lune sur les ondes sismiques précédant l'éruption

phréatique du Ruapehu suggère en effet une évolution vers une phase explosive.

Depuis la nuit des temps, l'humanité a conscience de l'influence importante de la Lune sur les animaux ou sur les marées ; et des chercheurs s'interrogent depuis des siècles sur son emprise sur des phénomènes géologiques tels que les éruptions volcaniques ou les tremblements de terre. S'il est évident que la Lune exerce une influence sur d'énormes masses d'eau (les marées), pourrait-elle avoir aussi un impact sur cette épaisse mousse visqueuse emplie de gaz qu'est le magma ?

LA LUNE PEUT-ELLE AGIR SUR UN VOLCAN ?

Lors des périodes de pleine lune et de nouvelle lune, les forces gravitationnelles exercées par la Lune et par le Soleil s'alignent, ce qui provoque à la surface océanique des gonflements tidaux plus importants qu'en moyenne, d'où les grandes marées. Au contraire, lors des premiers et derniers quartiers lunaires, ces gonflements sont plus faibles qu'en moyenne. Cette influence lunaire a des effets concrets observables non seulement sur les mers, mais aussi sur la croûte terrestre.

Les pressions d'origine lunaire sur la croûte terrestre sont de quelques kilopascals, c'est-à-dire quelques centièmes de kilogramme par centimètre carré. Elles sont à l'évidence trop faibles pour déclencher une éruption. Néanmoins, leurs effets sur les systèmes volcaniques demeurent mal connus.

Tous les volcans n'entrent pas en éruption en émettant du magma en surface. Certaines cocottes-minute volcaniques – des volcans renfermant d'importantes masses d'eau souterraine – produisent ce que l'on nomme les éruptions phréatiques, éruptions où l'eau souterraine joue un grand rôle. Souvent spectaculaires, elles s'accompagnent d'émissions de gaz,

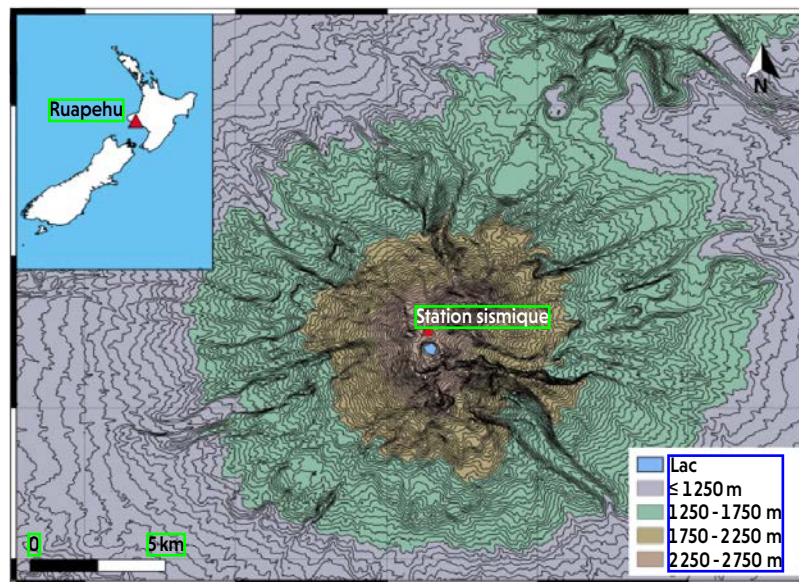
de fragments de roche et de cendres. Même si elles restent sans commune mesure avec les impressionnantes éruptions magmatiques, comme celle du Kilauea à Hawaï en 2018, elles posent beaucoup de problèmes aux autorités : leur caractère brusque et explosif met les populations en danger, sans qu'on ait le temps de les évacuer. Il suffit de se replonger dans l'inextricable polémique mêlant science et politique qui est née au cours de l'année 1976 à propos de la Soufrière, en Guadeloupe, pour se rendre compte de l'enjeu sociétal de cette question.

Si le nombre de victimes dues aux éruptions magmatiques a fortement diminué au cours des dernières décennies, celui imputé aux éruptions phréatiques ne diminue pas de façon notable. L'absence de signaux précurseurs détectables par des instruments scientifiques explique ce nombre de décès relativement constant. En 2014, au Japon, le volcan Ontakesan a fait plus de 50 victimes dans un pays qui a beaucoup d'expérience et qui est le plus avancé du monde sur le plan technique en matière de surveillance volcanique. Les images de randonneurs tués par des nuées ardentes ont fait le tour du monde, comme celles, en janvier dernier, de skieurs fauchés par des bombes volcaniques sur les pistes d'une station installée sur le volcan Kusatsu-Shirane.

Plusieurs éléments expliquent la difficulté de mettre en évidence des précurseurs d'éruptions phréatiques. Les faibles variations de porosité et les modifications pétrophysiques de la roche, ainsi que les variations subtiles de température et de pression précédant ces éruptions sont ténues et difficiles à détecter. Certaines éruptions phréatiques pourraient en effet se produire parce qu'à proximité de la surface se produit un colmatage par le soufre et les argiles circulant avec les fluides volcaniques. Ces couches relativement imperméables bloqueraient les flux de chaleur et de gaz ascendants et créeraient ainsi les conditions nécessaires à un *blue-sky event*. Dans ce cas, si l'on ne dispose pas d'instruments proches de l'activité principale, située à l'intérieur du volcan, mettre en évidence des signaux précurseurs relève de l'impossible.

Certains volcans sont pourtant équipés d'une pléthore d'instruments allant de stations de mesures continues des flux de gaz ou de température jusqu'à des détecteurs de muons. Dans le cas du volcan Ruapehu, un sismomètre est même installé sur le sommet, à quelques centaines de mètres du lieu d'agitation sismique continue. Il peut donc enregistrer le trémor volcanique. Cette sorte de grondement sismique continu et de faible intensité est due au choc du magma, des roches et des bulles de gaz qu'il transporte contre les parois des cheminées du volcan. La station sismique détruite lors de l'éruption du Ruapehu a enregistré le trémor et tous les événements sismiques perceptibles en

Le mont Ruapehu est un volcan à trois sommets situé sur l'île nord de la Nouvelle-Zélande, dont il constitue le point culminant. Son lac de cratère se remplit d'eau entre les éruptions, ce qui en fait un instrument de surveillance très sensible dans la mesure où sa température et les gaz qui le traversent indiquent l'activité du volcan. Or dans les semaines qui ont précédé le 27 septembre 2007, aucun signe préalable à la violente explosion qui s'est produite n'a été perceptible sur le lac. Cela suggère que la cocotte-minute volcanique que représente le Ruapehu était scellée de façon si étanche qu'aucun gaz ne pouvait remonter au sommet du volcan.



son sommet depuis des décennies. Comme beaucoup de ces données sont directement accessibles aux chercheurs du monde entier, elles constituent une mine d'informations pour essayer d'interpréter le trémor volcanique.

TROIS MOIS AVANT L'ÉRUPTION, UNE SIGNATURE LUNAIRE

Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une multitude de techniques d'analyse de données, dont certaines ont été développées dans d'autres domaines que la volcanologie, par exemple dans l'analyse financière. Après avoir étudié plus d'une douzaine d'années de données, nous avons fini par détecter une structure dans le trémor : une synchronisation entre le volcan et la Lune environ trois mois avant l'éruption.

Explicitons un peu notre observation. Les vibrations sismiques du sol du volcan – le trémor – semblent avoir été dans une certaine mesure modulées par les cycles lunaires ; hors période éruptive, le trémor n'est en revanche absolument pas synchronisé avec eux. C'est là, pour le moins, une observation surprenante ! Si la Lune est en effet capable de perturber de grandes masses reposant librement à la surface de la Terre, les forces qu'elle exerce à l'intérieur de la planète sont de trois ordres de grandeur trop faibles pour provoquer une fracture de la roche et, par là, une éruption.

Dès lors, comment expliquer notre observation ? Pourrait-il s'agir d'une structure erratique des données, qui ne se reproduira jamais ? Nous



avons évalué la probabilité de cette possibilité: les chances que la corrélation observée se produise de façon fortuite sont de 1 sur 3,5 millions, c'est-à-dire extrêmement faibles. D'où l'hypothèse suivante: lorsque le volcan est dans un état critique, c'est-à-dire dans un état prééruptif, les forces de marée influenceraient ses tremblements. Si cette hypothèse est correcte, alors il sera en principe possible de déduire du trémor qu'un volcan s'approche du seuil critique.

Pour tester cette idée, nous avons modélisé la mécanique du volcan en état critique afin de tenter de reproduire le phénomène en question et d'étudier les facteurs qui l'influencent.

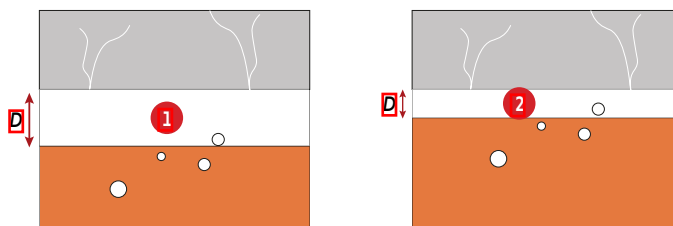
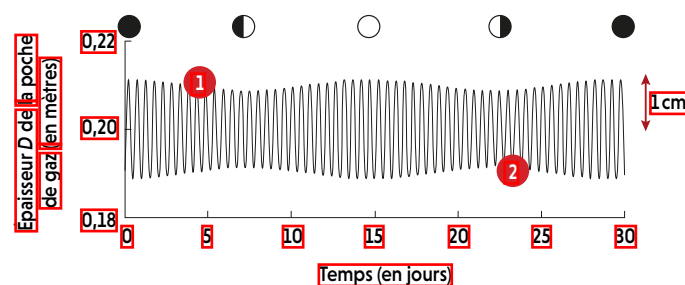
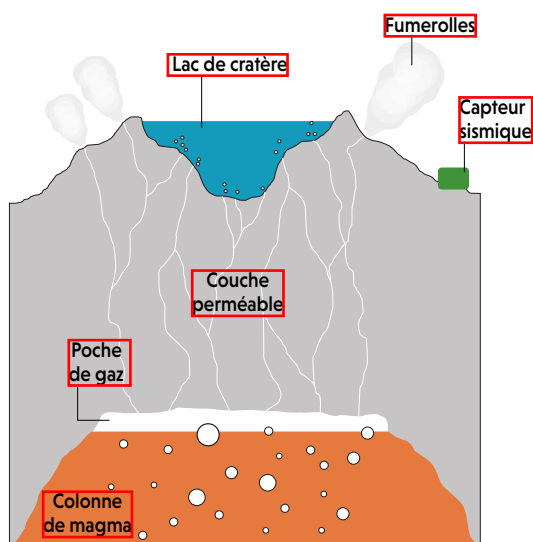
Les chances que la corrélation observée se produise de façon fortuite sont de 1 sur 3,5 millions

Le volcan renferme un conduit vertical où la lave monte et descend, tandis qu'un bouchon solide poreux lié aux particules transportées par les flux de gaz est supposé s'être accumulé juste au-dessus de cette colonne magmatique. Il retient les volatiles libérés par le magma, de sorte qu'une poche de gaz se forme à quelques centaines de mètres de profondeur. Le volume de gaz sous pression qu'elle contient résulte de deux processus en concurrence: d'une part l'arrivée de fluides magmatiques, dont des gaz, depuis les niveaux plus profonds; d'autre part le flux de gaz qui percole à travers les portions superficielles poreuses du volcan. C'est cette poche de gaz sous forte pression qui est la source de l'essentiel de la microactivité sismique: elle répercute à la partie supérieure de l'édifice volcanique les vibrations qui se produisent en son sein lors de l'arrivée ou du départ de quantité de gaz.

Or, même faibles, les forces de marée compriment régulièrement le réservoir magmatique. Si l'on suppose par exemple que le passage de la Lune se traduit (avec un certain retard) par une hausse du niveau du magma, de l'ordre de 1 centimètre, alors l'accroissement de pression dans la poche de gaz se traduira par une augmentation de l'amplitude des vibrations de l'édifice volcanique supérieur, en raison de sa mise sous tension. À l'inverse, une baisse comparable du niveau de magma due à l'éloignement de la Lune se traduira par une diminution de l'amplitude des vibrations de l'édifice volcanique supérieur. Finalement, ces phénomènes se traduiront par une modulation périodique du trémor, corrélée au passage de la Lune.

Comment la poche de gaz peut-elle être si sensible à ces effets *a priori* extrêmement petits? Pour nous en persuader, nous avons essayé de reproduire numériquement la situation au Ruapehu. D'environ 20 centimètres de haut, la poche de gaz sous pression se trouve à quelque 10 mètres sous le fond du lac de cratère, profond de 200 mètres, au-dessus d'une colonne magmatique d'une dizaine de mètres de largeur. Nous avons supposé que l'arrivée permanente d'environ 50 kilogrammes de gaz par seconde met en vibration la poche de gaz sous pression et tenu compte du fait que la station sismologique du mont est distante de quelque 700 mètres. Nous avons alors calculé des sismogrammes s'étendant sur plusieurs cycles lunaires, et constaté que dans les conditions fixées dans notre modèle, l'influence des forces de marée se lit bien dans le trémor.

Une analogie allant dans le sens d'une possible influence de la Lune sur certaines cocottes-minute volcaniques surgit de la comparaison avec le comportement des lacs quand le sol est secoué. À cause de leur caractère fluide et de leur grande surface de contact avec le sol, les lacs répercutent en effet les mouvements telluriques instantanément. >



➤ Dans une autre étude, nous avons montré qu'en fonction de leur morphologie, les lacs peuvent entrer en résonance (vibrer amplement à certaines fréquences). Ce fort couplage s'observe facilement quand de brusques mouvements des masses d'eau du lac font trembler le sol. Ainsi, on a maintes fois observé que le remplissage brusque des lacs-réservoirs de barrage déclenche de petits tremblements de terre. Par exemple, le 29 septembre 1971, le remplissage du lac-réservoir de l'Alesani, en Corse, a produit un séisme de magnitude 4 dans une zone jusqu'à complètement asismique centrée sur le lac.

Ainsi, c'est l'importance de la poche de gaz du volcan – des dizaines à des centaines de mètres cubes – qui explique le bon couplage entre la vapeur sous pression et la partie supérieure de l'édifice volcanique et, partant, la modulation que la Lune se révèle capable d'imprimer aux vibrations.

UN EFFET QUE LA MODÉLISATION CONFIRME

C'est du moins ce que notre modèle prédit, puisqu'il reproduit une influence des forces lunaires sur le signal sismique lorsque la perméabilité de l'édifice volcanique passe sous une valeur critique, c'est-à-dire lorsque le bouchon retenant le gaz est assez étanche. Nous pensons donc qu'en 2006-2007, le volcan Ruapehu a été sensible aux cycles lunaires parce qu'il était fortement scellé, suite à l'accumulation de particules. D'après nos observations sur le volcan Ruapehu, c'est selon un rythme bimensuel que les forces lunaires de marée agissent sur un édifice volcanique scellé.

Il devient donc envisageable de mettre en évidence l'état des portions superficielles d'un volcan – son scellement essentiellement – en

étudiant la réponse sismique aux excitations lunaires. Différents prérequis sont cependant nécessaires : la présence d'une poche de gaz, l'existence de stations sismiques à proximité directe de celle-ci et la disponibilité de plusieurs années de données sismiques. Nous nous demandons par ailleurs si des volcans très distants des lieux sur la planète où les effets de marée de la Lune sont maximaux seront sensibles aux pressions développées sur le système. Nous explorons donc d'autres jeux de données volcaniques, notamment ceux des volcans Turrialba et Poás, au Costa Rica. À ce stade, la plus grande difficulté consiste à trouver des séries de données longues et continues.

Si d'autres cas corroborent nos observations au Ruapehu, nous aimerions créer un outil de surveillance en temps réel. Mais nous voudrions éviter de fournir un paramètre difficile à interpréter à des observatoires volcanologiques devant prendre des décisions en urgence. Nous collaborons activement avec nos collègues néozélandais responsables de la surveillance volcanique, dont celle du volcan Ruapehu, dans le cadre d'autres projets. Bien qu'ils apprécient notre étude, ils attendent que l'on ait mis en évidence d'autre cas de modulation du trémor sur le même volcan ou sur d'autres avant d'envisager d'implémenter un outil de surveillance en temps réel.

Signalons pour terminer que nous voulons aussi explorer d'autres objets géologiques tels les zones de plaques tectoniques sujettes à des stress intenses, qui pourraient peut-être résonner avec la Lune dans certaines conditions. Aurons-nous une chance d'observer une incidence lunaire sur les signaux sismiques observés dans ces zones ? Cela semble peu probable, mais la recherche avance souvent à l'occasion de tests d'hypothèses *a priori* farfelues. ■

La structure de la cocotte-minute volcanique que représente le Ruapehu est schématisée gauche. Un sismogramme obtenu par modélisation de cet édifice volcanique reproduit les modulations du trémor en fonction des phases de la Lune, avec en (1) une poche de gaz et un trémor augmentés et en (2) une poche de gaz et un trémor diminués.

BIBLIOGRAPHIE

T. Girona, C. Huber et C. Caudron, **Sensitivity to lunar cycles prior to the 2007 eruption of Ruapehu volcano**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 1476, 2018.

M. Detay, **Traité de volcanologie physique**, Lavoisier, 2017.

microbiote

d'après *le charme discret de l'intestin*

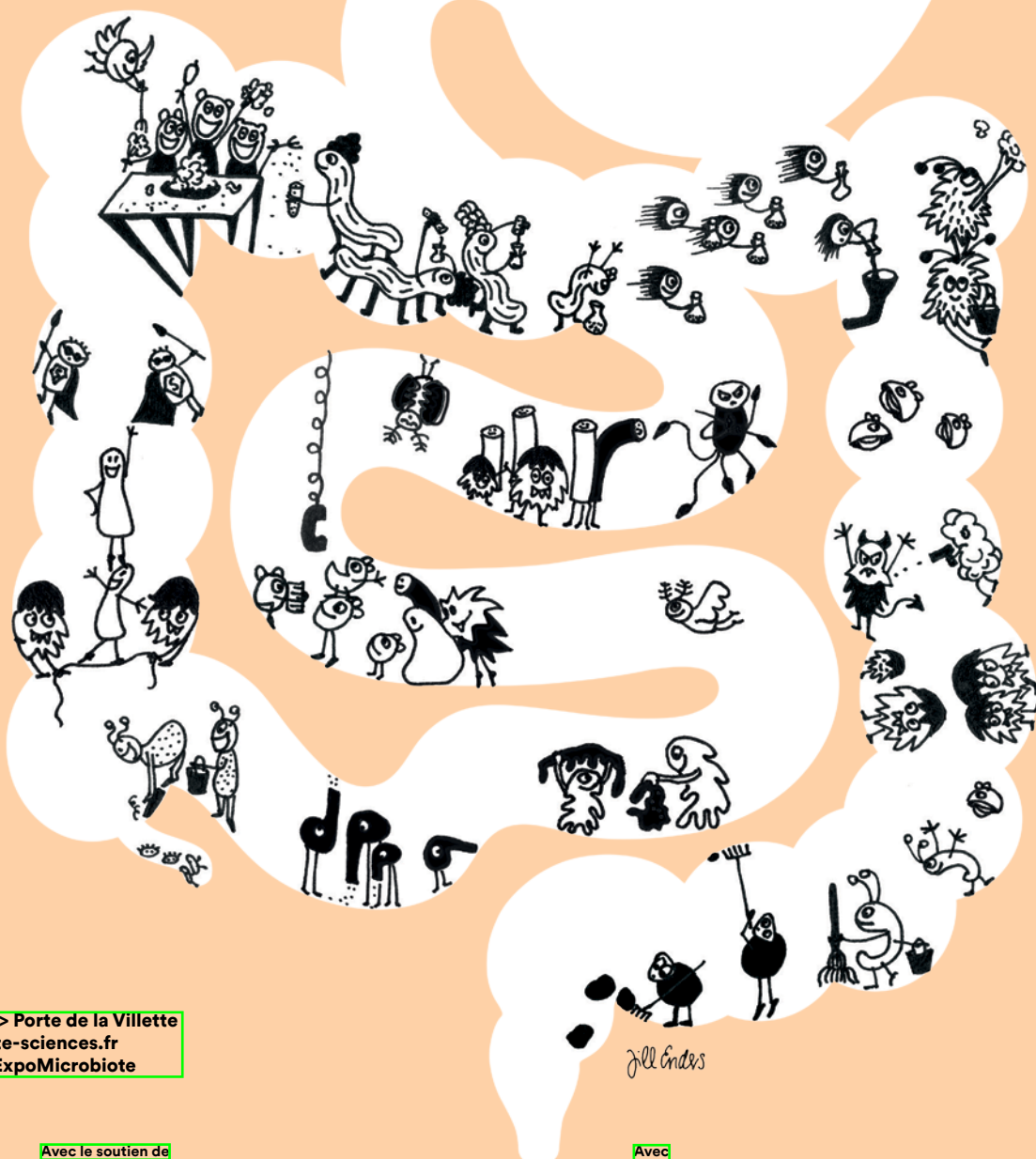
exposition

4 décembre 2018

— 4 août 2019

cité

sciences
et industrie



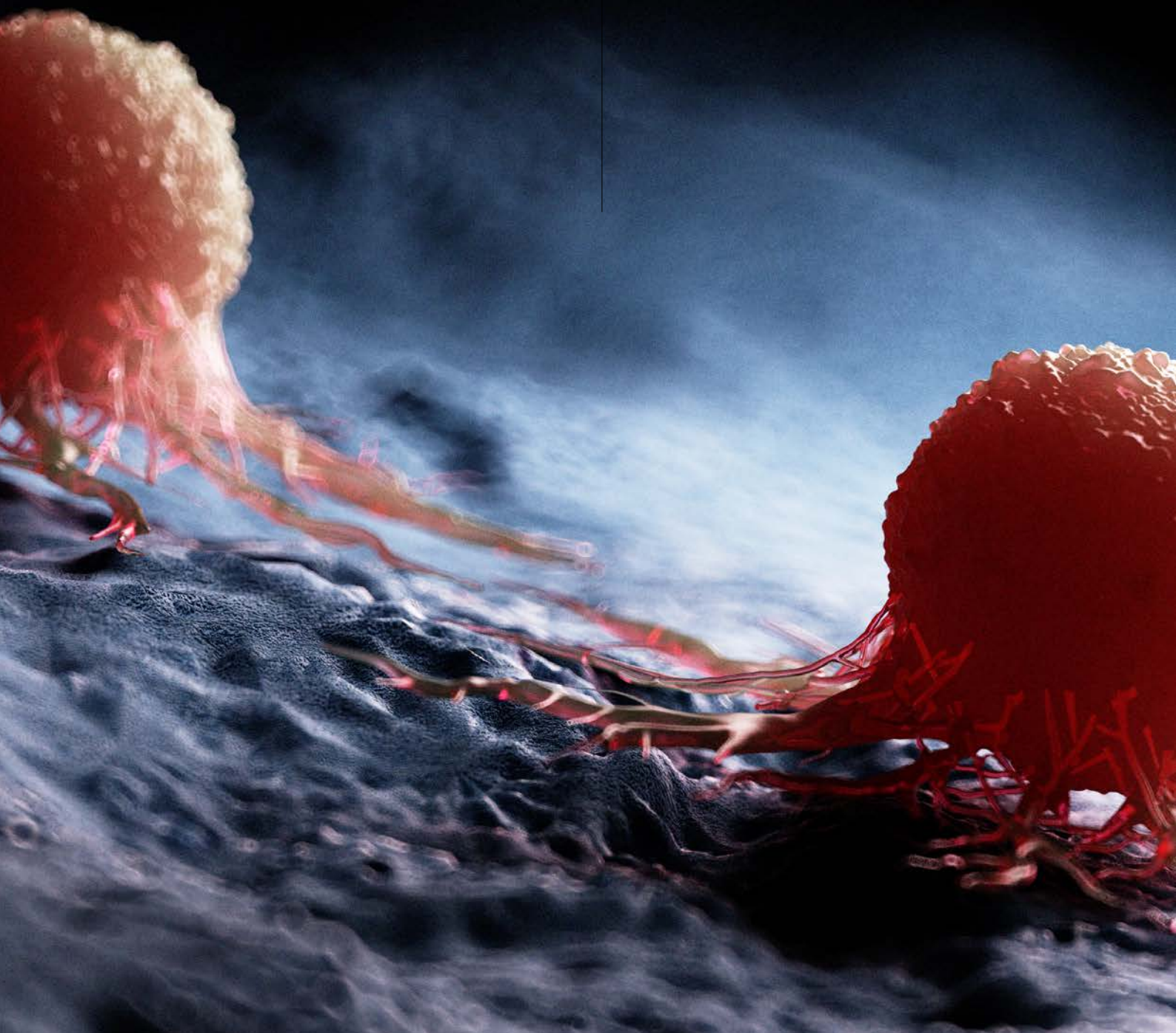
M > Porte de la Villette
cite-sciences.fr
#ExpoMicrobiote

En partenariat avec

Avec le soutien de

Avec



**L'ESSENTIEL**

> Des arbres inspirés de la biologie évolutive retracent l'histoire du cancer d'un patient en révélant le degré de parenté qui relie les cellules cancéreuses des différents tissus.

> Des mutations précoces de certains gènes « pilotes » semblent responsables de la formation à la fois de la tumeur principale et de ses métastases.

> Les métastases pourraient être dues à d'autres facteurs que les mutations, comme des modifications épigénétiques ou simplement le microenvironnement biologique de la cellule.

> Dans le futur, tracer l'arbre des mutations chez un patient donné devrait aider les oncologues à traiter les cancers résistants.

L'AUTEUR

JEFFREY TOWNSEND
maître de conférence
à l'École de santé publique
de l'université Yale

La généalogie d'une tumeur

Dans un cancer, le principal danger vient des métastases de la tumeur primaire. La détermination de l'arbre de parenté des tissus cancéreux chez un même patient a montré que ces tumeurs secondaires ont pour origine plusieurs mutations clés survenues très tôt dans le foyer initial.

Pour retracer l'arbre de la vie, qui rassemble tous les organismes vivants, les biologistes de l'évolution s'appuient depuis longtemps sur l'étude des gènes. Peut-on s'inspirer de leurs méthodes pour mieux comprendre comment un cancer apparaît et étend ses ramifications mortelles dans tout l'organisme? La réponse est oui.

Notre organisme est un assemblage de cellules qui, en coopérant, assurent son fonctionnement. Dans cette vision, les cellules obéissent à un pacte établi à la suite d'essais et d'erreurs et que les premières formes de vie pluricellulaire ont signé il y a plus de 600 millions d'années. Le contrat d'alliance stipule que si pour cohabiter, les cellules doivent suivre des règles de base: réparer leur ADN lorsqu'il est endommagé; rester à l'écoute de leurs voisines au cas où, par exemple, un ordre de division cellulaire est donné; et demeurer dans le tissu où elles sont censées être.

En règle générale, les mutations qui amènent les cellules à violer ce contrat de colocation et à proliférer de façon chaotique (les marques d'une tumeur maligne) sont éliminées. Les cellules mutées détectent leurs propres dysfonctionnements et se suicident (mort cellulaire programmée ou apoptose) ou sont détruites par le système immunitaire avant d'avoir endommagé l'organisme.

Toutefois, il arrive que s'accumulent des mutations contre lesquelles le système de surveillance cellulaire se révèle impuissant. Alors les tumeurs se développent et se propagent – comme le feraient des espèces invasives en milieu naturel. Les chercheurs connaissent certaines mutations à l'origine de la tumorigenèse, la formation de la tumeur initiale. Mais les véritables ennemis contre lesquels ils luttent sont les métastases. Celles-ci confèrent au cancer son caractère particulièrement létal. Ce sont des populations de cellules cancéreuses ayant migré à partir d'un foyer d'origine. Jusqu'à peu, la majorité des oncologues considéraient que les métastases apparaissaient à cause de nouvelles mutations dans les cellules tumorales et que ces mutations se produisaient relativement tard dans l'histoire de la tumeur primitive. Partant de ce principe, ils cherchaient à identifier ces mutations et à les cibler avec des médicaments.

Vers 2010, cependant, les avancées techniques ont permis aux scientifiques de séquencer à faible coût le génome humain tout entier (c'est-à-dire d'y déterminer l'ordre des constituants de l'ADN, les bases). Des groupes de recherche de plusieurs institutions ont alors commencé à étudier de manière exhaustive l'ADN des cellules tumorales. Mais à leur grande consternation, les chercheurs ont

découvert qu'au sein même d'un unique patient, les tissus atteints présentaient des profils génétiques extrêmement variés. Agir sur toutes ces mutations pour soigner le cancer devenait dès lors difficile.

RETRACER L'ÉVOLUTION DU CANCER D'UN PATIENT

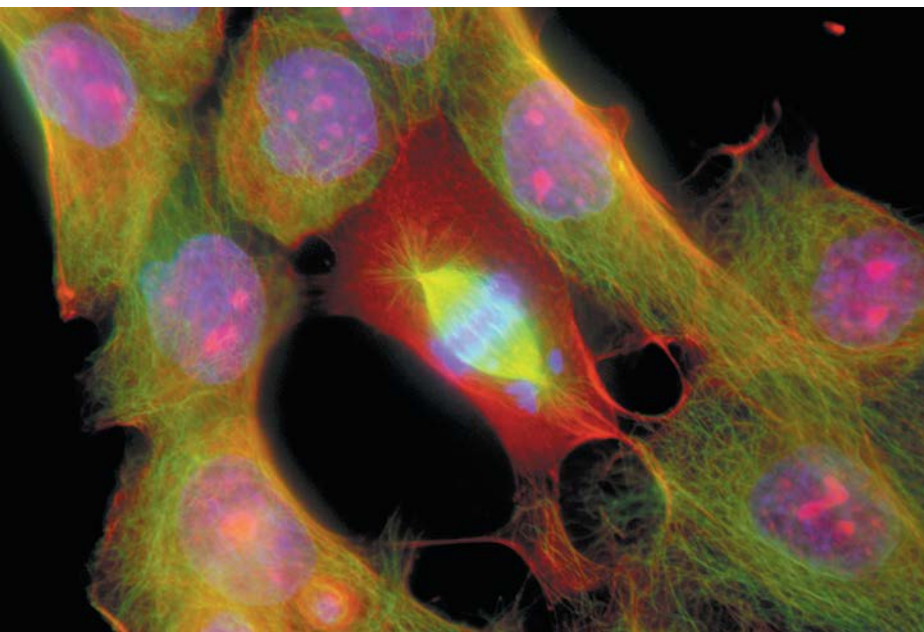
Les biologistes de l'évolution (dont moi) voient cependant la diversité comme une source d'informations précieuses. Avec des collègues de l'université Yale et d'autres institutions, j'ai décidé d'étudier comment les mutations étaient liées les unes aux autres. En appliquant des méthodes issues de la biologie de l'évolution, utilisées d'ordinaire pour reconstituer les arbres phylogénétiques, nous avons évalué les liens de parenté de l'ensemble des cellules formant les tumeurs d'un cancer. Nous avons ainsi montré que les tumeurs secondaires naissent de façon aléatoire, indépendamment les unes des autres. Plus inattendu encore, certaines bourgeonnent plusieurs années avant que la tumeur initiale ne soit diagnostiquée. Ces découvertes sont effrayantes, mais aussi porteuses d'espoir, car elles suggèrent qu'en ciblant, dans la tumeur primaire, les gènes altérés précocement, on augmenterait les chances de guérison des patients.

Quand notre aventure a commencé, en 2010, un modèle linéaire servait de guide à la recherche sur le cancer depuis des décennies.

POURQUOI L'ARBRE DU CANCER A SURPRIS LES ONCOLOGUES

La découverte que les cellules cancéreuses ne suivaient pas un modèle linéaire, mais en branches, a surpris la communauté. De fait, avant les années 2010, les biologistes savaient depuis longtemps que les tumeurs sont génétiquement très hétérogènes. En particulier, il était connu que les cancers à un stade avancé présentent une forte variabilité au niveau des chromosomes (leur nombre et leurs structures sont variables d'une cellule cancéreuse à une autre). En outre, certains

indices expérimentaux laissaient penser que cette hétérogénéité s'étendait à l'ADN même. Pour autant, on aurait pu prétendre que ces anomalies frappant les chromosomes étaient une conséquence des modifications génétiques conduisant au cancer et non une composante clé de celui-ci. Rien n'assurait donc que les tumeurs possédaient une forte variabilité génétique dès l'apparition des premières cellules tumorales. C'est pourquoi la découverte de l'existence de multiples lignées génétiques indépendantes au sein de la tumeur principale et le fait qu'elles pouvaient métastaser indépendamment a étonné la communauté scientifique.



Une métastase (ici des cellules d'une métastase au foie, dont une, au centre, est en cours de division) est une tumeur secondaire issue d'une cellule métastatique qui s'est détachée de la tumeur primaire et a atteint une autre région de l'organisme via la circulation sanguine, où elle s'est mise à proliférer.

Selon ce modèle, une tumeur n'apparaît que lorsqu'une série spécifique de mutations a perturbé une cellule. Alors seulement, des cellules de la tumeur primaire acquièrent une ou plusieurs mutations qui leur confèrent la capacité de produire des métastases.

Or ce schéma ne cadrerait pas avec ce que les biologistes de l'évolution savent de l'histoire des formes de vie. Mutation et sélection naturelle conduisent les organismes à diverger constamment, ce qui engendre une grande variété de lignées génétiques plutôt qu'une seule et même population dont la diversité augmenterait graduellement. De fait, les premières études sur la variété génétique du cancer, de Marco Gerlinger, de l'Institut de recherche sur le cancer, à Londres, et d'autres suggéraient que même au sein d'une tumeur primaire, les cellules présentaient des séquences génétiques différentes d'une zone à l'autre.

Avec le pathologiste David Rimm, le généticien Richard Lifton et le pharmacologue Joseph Schlessinger, tous trois à la faculté de médecine de l'université Yale, des membres de mon laboratoire et moi-même avons cherché à répondre à trois questions que ces observations soulevaient. Premièrement, une ou plusieurs mutations spécifiques sont-elles nécessaires à l'apparition de métastases? Deuxièmement, les lignées métastatiques divergent-elles tôt dans l'histoire de la tumeur primaire, avant que la plupart des mutations ne se soient accumulées? Troisièmement, si nous découvrions une diversité de mutations dans les tumeurs primaires et les métastases, pourrions-nous utiliser les outils de la biologie évolutive pour calculer quand elles ont tendance à se produire? En répondant à ces questions, nous espérons remonter le chemin

génétique menant des métastases jusqu'à la naissance de la tumeur primaire.

Nous n'avions aucune idée de la puissance dont allaient bientôt faire preuve nos outils de biologie évolutive. Pour commencer, David Rimm obtint des tissus de tumeurs primaires et secondaires, ainsi que des parties saines voisines des organes touchés, qui avaient été prélevées lors de l'autopsie de 40 patients décédés de 13 types de cancers différents. Pour chaque échantillon, notre équipe séquençait toutes les parties du génome que l'on sait être exprimées à tout moment dans tous les tissus. Notre étude révéla que plusieurs dizaines à plusieurs milliers de mutations séparaient la séquence génétique normale du patient et celles des tissus cancéreux. Pour comprendre comment ces échantillons étaient reliés les uns aux autres, Zi-Ming Zhao, alors postdoctorant dans mon laboratoire, construisit leur phylogénie moléculaire, c'est-à-dire leur arbre de parenté fondé sur les ressemblances de leurs séquences génétiques.

UN ARBRE DE PARENTÉ DE LA TUMEUR PRIMAIRE ET DE SES MÉTASTASES

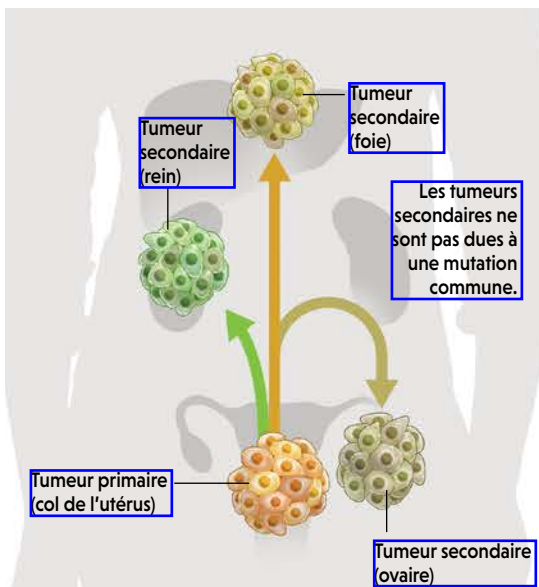
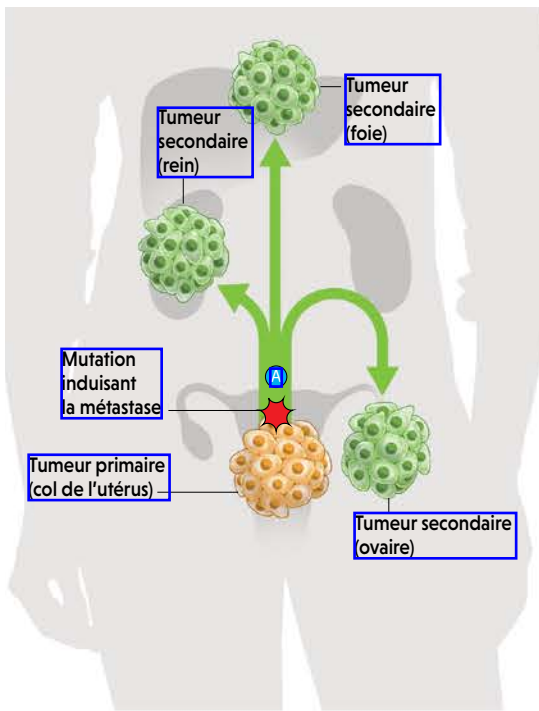
On se sert de ce type d'arbre, par exemple, pour comprendre notre relation avec les chimpanzés, les gorilles et les orangs-outans, et les liens que les primates entretiennent avec le reste du vivant, avec les oiseaux, les plantes et les bactéries. Les scientifiques calculent ces arbres en comparant la façon dont, d'une espèce à l'autre, la séquence des constituants de l'ADN des individus diverge, puis en recherchant l'arbre le plus plausible susceptible d'accueillir chaque espèce sur ses branches.

Toutefois, l'application de ces techniques au cancer est délicate. D'ordinaire, on part de séquences génétiques d'animaux modernes et on en déduit le maximum d'informations sur leurs ancêtres. Or, dans le cas du cancer, on connaît la séquence génétique de l'ancêtre: c'est celle des tissus sains. Mais cette séquence normale est contemporaine de celles des tissus cancéreux. Aussi, par défaut, les approches classiques de phylogénie moléculaire la considéraient comme une lignée supplémentaire «descendante» et non comme une lignée ancestrale, ce qui ne reflète pas l'histoire évolutive du cancer. Nous avons donc modifié les modèles mathématiques pour corriger cela (nous avons exigé que la séquence génétique des tissus sains soit l'ancêtre de celles des lignées tumorales primaire et métastatiques), puis nous avons calculé quels arbres expliqueraient au mieux la succession des changements observés.

Nos arbres révélèrent un élément frappant. Selon le modèle linéaire établi de longue date, toutes les métastases proviendraient d'une

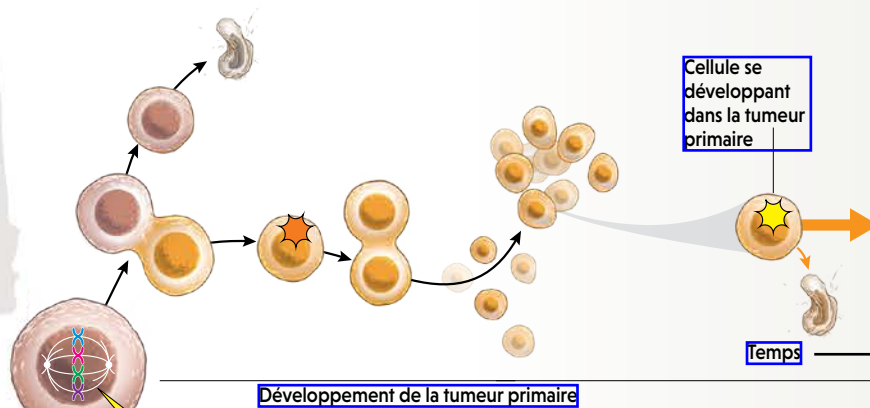
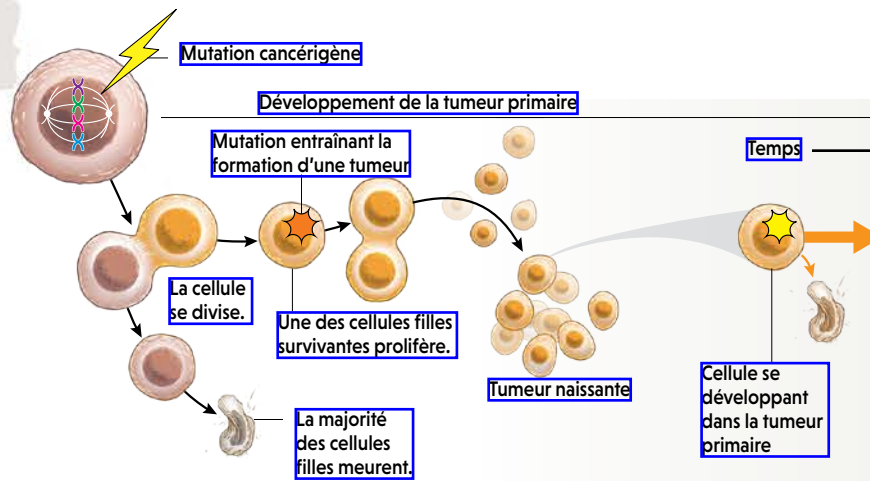
LINÉAIRE OU À BRANCHES?

Si les cancers sont si létaux, c'est à cause des métastases – l'installation de cellules cancéreuses issues de la tumeur primaire dans des tissus sains. Suivant le modèle linéaire de propagation du cancer (en haut), les oncologues ont longtemps recherché les mutations qu'ils pensaient responsables des métastases, afin de les cibler. Toutefois, les arbres phylogénétiques des cellules cancéreuses que l'auteur a construits pour plusieurs patients indiquent que ce modèle ne reflète pas les données. Au lieu qu'une ou plusieurs mutations clés induisent des métastases, les branches de l'arbre du cancer qui conduisent aux tumeurs secondaires émergent aléatoirement de la tumeur primaire (en bas). Aucune mutation particulière n'est requise pour qu'une cellule se mette à métastaser.



LE MODÈLE LINÉAIRE

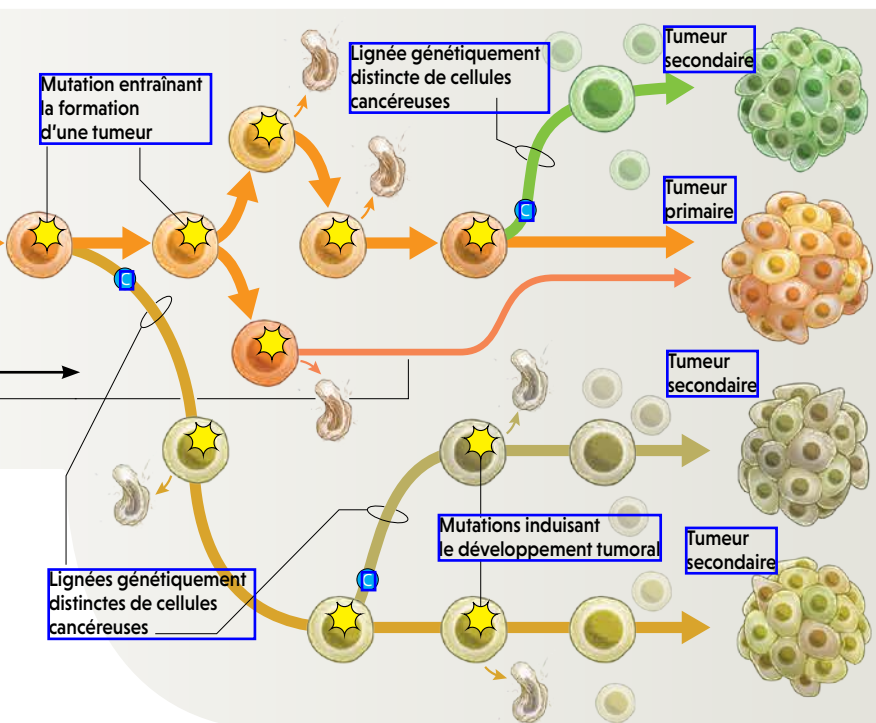
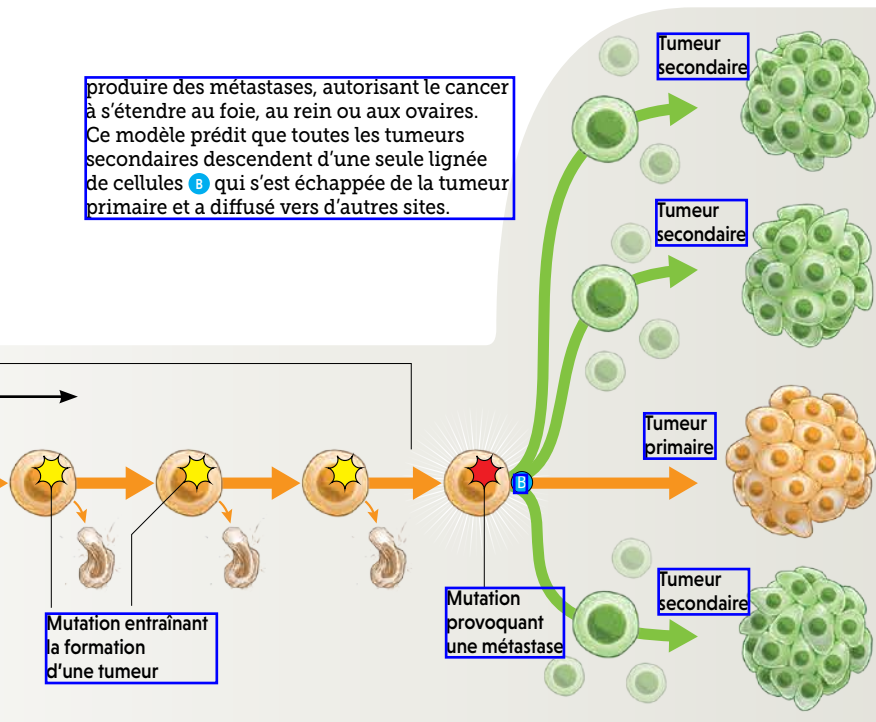
Pendant des décennies, les chercheurs en cancérologie ont pensé qu'une série spécifique de mutations, en s'accumulant, pilotait la formation d'une tumeur et que les métastases n'apparaissent qu'après cette phase d'initiation, à la suite de nouvelles mutations. Dans ce modèle linéaire, si, par exemple, une tumeur se forme dans le col de l'utérus, une seule mutation additionnelle (A) suffirait à



LE MODÈLE À BRANCHES

Les arbres phylogénétiques de l'auteur ont révélé que les tumeurs secondaires sont issues de multiples lignées génétiques (C) présentes dans la tumeur primaire. Par conséquent, les tissus métastasés peuvent être plus proches, du point de vue génétique, de la tumeur originelle que les uns des autres. Ces découvertes suggèrent qu'au lieu de cibler des gènes présumés responsables des métastases, les oncologues pourraient obtenir de meilleurs résultats en visant des gènes « pilotes », dont les mutations semblent intervenir dans la formation à la fois de la tumeur et des métastases.

produire des métastases, autorisant le cancer à s'étendre au foie, au rein ou aux ovaires. Ce modèle prédit que toutes les tumeurs secondaires descendent d'une seule lignée de cellules **B** qui s'est échappée de la tumeur primaire et a diffusé vers d'autres sites.



lignée unique de cellules qui se seraient détachées de la tumeur primaire et auraient migré vers d'autres sites. Si tel est le cas, c'est-à-dire si une unique succession de mutations dans la tumeur primaire est la cause de toutes les métastases, on s'attend à ce que la séquence génétique de chaque tumeur secondaire soit plus étroitement liée à celle des autres tumeurs secondaires qu'à n'importe quelle partie de la tumeur primaire.

Ce n'est pas ce que nous avons vu. Dès l'analyse des premiers arbres, nous avons repéré des patients dont le tissu tumoral primaire était étroitement lié à certains tissus métastatiques, mais pas à d'autres. Ce qui ne pouvait signifier qu'une chose: les métastases ne résultaient pas d'une, mais de plusieurs lignées génétiques au sein de la tumeur primaire. Nous avons retrouvé cette configuration dans plus d'un tiers des cas où nous avons réussi à construire un arbre fiable.

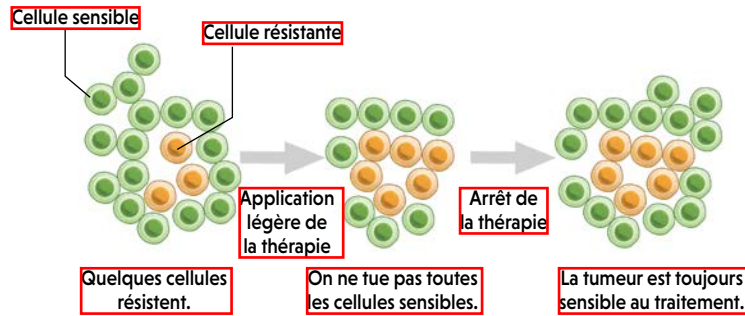
PAS DE MUTATION À L'ORIGINE DES MÉTASTASES?

Nous étions stupéfaits de voir que le modèle linéaire classique ne correspondait pas aux données réelles. Ce n'était pas un seul événement rare qui provoquait toutes les métastases, mais les changements génétiques précoces à l'origine même de la prolifération de la tumeur primaire. Ces mutations rendaient manifestement aussi certaines lignées cellulaires capables de métastaser.

De plus, dans les lignées cellulaires ayant évolué en métastases, il nous était impossible d'identifier un gène coupable. En dehors des gènes clés déjà connus pour déclencher la tumorigenèse (comme le gène *KRAS*, qui est muté dans les tumeurs primaires de presque tous les patients atteints d'un cancer du pancréas), aucun gène des tissus métastatiques n'était muté chez plusieurs patients. En fait, les mutations trouvées dans les branches conduisant à des tumeurs secondaires étaient indiscernables de celles de lignées n'ayant jamais quitté la tumeur primaire. Nous en avons déduit que d'autres facteurs que les mutations étaient à blâmer dans l'apparition des métastases, comme des modifications épigénétiques (des altérations de l'expression des gènes) d'une cellule de la tumeur primaire ou les caractéristiques de son microenvironnement.

Des modifications épigénétiques dans un petit groupe de cellules, dues par exemple à l'exposition à une substance cancérigène, pourraient en effet augmenter la propension des cellules à migrer. La position d'une cellule tumorale par rapport aux autres types de cellules de l'organisme pourrait aussi jouer un rôle dans le processus métastatique. Par exemple, certaines cellules tumorales pourraient se

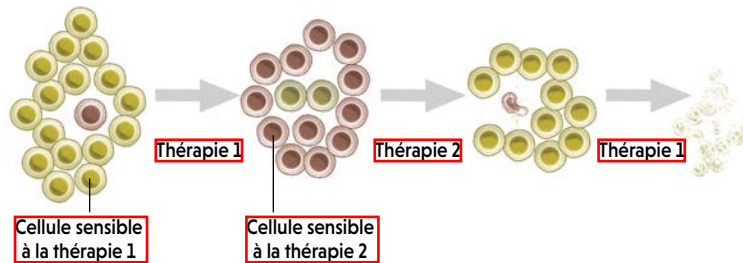
LA PISTE DE LA THÉRAPIE « ADAPTATIVE »



Le fait que la prolifération de ces cellules cancéreuses soit régie par les mécanismes évolutifs n'est pas forcément une bonne nouvelle pour les thérapies. En effet, combattre un ennemi darwinien est souvent vu comme s'engager dans une course aux armements avec un adversaire qui ne sera jamais à court d'imagination. Dans le cas de la résistance aux antibiotiques, de nouvelles souches résistantes apparaissent tous les jours, de sorte que les laboratoires pharmaceutiques ont de plus en plus de difficultés à développer de nouvelles molécules antibiotiques. Néanmoins, cela soulève également des motifs d'espoir pour l'élaboration de nouvelles stratégies thérapeutiques.

Il faut dire que les traitements anti-cancer, en grossissant le trait, relèvent encore aujourd'hui plus du remède de cheval que de la frappe chirurgicale. Ils consistent à essayer de tuer le maximum de cellules cancéreuses, en endommageant le moins possible les cellules dites saines. En conséquence, les traitements ciblent les cellules cancéreuses qui sont le plus présentes dans les tumeurs (et uniquement dans celles-ci). Si la tumeur est prise à un stade précoce (quand relativement peu de mutations sont présentes), ce type de traitement peut effectivement éradiquer la totalité des cellules cancéreuses.

En revanche, lorsque la tumeur est découverte à un stade plus avancé, l'hétérogénéité génétique au sein de la tumeur peut être particulièrement élevée. Ainsi, les cellules cancéreuses sensibles au traitement vont disparaître, mais parmi la grande diversité des cellules présentes dans la tumeur, certaines seront résistantes au traitement. Pire, le traitement ayant supprimé la quasi-totalité des cellules



La thérapie adaptative vise à éviter que des cellules résistantes s'installent dans la tumeur, par exemple en ajustant le temps de traitement en fonction de la réponse de la tumeur (*en haut*) ou en combinant plusieurs traitements au cours du temps (*en bas*).

sensibles, les cellules résistantes sont ainsi libérées de leur compétition avec les cellules sensibles pour l'accès aux ressources fondamentales à leur cycle cellulaire. C'est ainsi que se met en place la résistance aux chimiothérapies.

Une nouvelle approche, fondée sur la théorie de l'évolution, est en train de voir le jour pour combattre ce phénomène. Baptisée « thérapie adaptative », cette nouvelle forme de thérapie a un objectif radicalement différent de l'approche classique. En effet, au lieu de chercher à éradiquer la tumeur, l'objectif est de contrôler sa croissance pour qu'elle n'atteigne pas une taille dangereuse pour la santé de l'individu tout en s'assurant que les cellules cancéreuses résistantes soient toujours en compétition avec les cellules cancéreuses sensibles, et donc que les cellules résistantes ne deviennent pas majoritaires.

D'abord développée au sein de modèles mathématiques, puis testée avec succès sur des modèles expérimentaux, cette approche reposant sur des administrations plus légères de chimiothérapies à intervalles réguliers fait aujourd'hui l'objet de plusieurs essais cliniques chez l'humain aux États-Unis,

notamment au centre anti-cancer Moffit, à Tampa (Floride). Ainsi, sur le cancer métastatique de la prostate, seulement 1 patient sur 11 avait connu une réémergence de son cancer après 30 mois de traitement avec cette approche évolutionniste contre 14 patients sur 16 avec une approche classique. L'efficacité à long terme avait été multipliée par presque dix ! En outre, les patients avaient reçu en moyenne 47 % de chimiothérapie en moins avec la thérapie adaptative, ce qui a aussi eu pour conséquence de diminuer les effets secondaires du traitement. Si l'application des concepts de la biologie évolutive à la recherche sur le cancer n'en est qu'à ses débuts, la dynamique scientifique est bel et bien lancée et les promesses de l'approche défendue dans cet article et celle de la thérapie adaptative s'avèrent nombreuses.

BENJAMIN ROCHE

IRD, Centre de recherches écologiques et évolutives sur le cancer, Montpellier

propager dans l'organisme parce qu'elles se trouvent à proximité d'un vaisseau sanguin ou lymphatique, tandis que d'autres cellules présentant les mêmes mutations, mais plus éloignées, resteraient inoffensives. Ces autres facteurs potentiellement capables d'agir sur la formation des métastases auraient alors peu ou rien à voir avec les mutations ultérieures apparaissant dans nos arbres phylogénétiques.

Une fois convaincus que des lignées divergentes de la tumeur primaire produisaient

parfois des métastases distinctes, nous nous sommes demandé à quel moment dans la vie du patient ces lignées métastatiques divergeaient. Or nos arbres de phylogénie moléculaire ne répondaient pas à cette question: la longueur des branches ne correspond pas au temps réel, mais au nombre de mutations qui distinguent différentes parties du cancer, par exemple la tumeur primaire et les métastases. Ils ne nous renseignent pas sur le temps nécessaire à une tumeur pour donner naissance à

une autre. Nous nous sommes alors interrogés : et si nous utilisions une autre technique de la biologie évolutive – la construction d'arbres temporels – pour comprendre l'histoire de la progression du cancer dans le corps humain ? Dans un arbre temporel, la longueur d'une branche mesure le temps qui s'est écoulé entre l'apparition d'une espèce et sa différenciation en une autre. De telles représentations, obtenues en comparant les caractéristiques d'intérêt (les séquences génétiques, par exemple) et en les combinant avec des informations temporelles (comme les taux de mutation), permettent aux scientifiques de situer chronologiquement les changements clés. On les a utilisées, par exemple, sur des données fossiles pour révéler comment s'est déroulée l'explosion de la vie pluricellulaire au Cambrien, il y a près de 550 millions d'années.

UN ARBRE TEMPOREL DU CANCER

Bien sûr, nous n'avions pas de données fossiles pour calibrer l'évolution du cancer chez un individu. Mais nous avons peut-être mieux. Dans de nombreux cas, nous possédions des tissus primaires extraits avant l'autopsie. En outre, nous disposions des dossiers médicaux de chaque patient, indiquant sa date de naissance, celle où le diagnostic avait été posé et encore d'autres données temporelles sur la biopsie, l'ablation chirurgicale d'une tumeur et l'autopsie. Les dates de ces événements ont servi de points d'étalonnage. Par exemple, le cancer n'avait pas pu apparaître avant l'année de naissance et devait exister lors du diagnostic

La première mutation était survenue des décennies avant le diagnostic du cancer

de la tumeur primaire. Les dates des biopsies et des ablations tumorales nous ont donné un aperçu de l'évolution du cancer. Finalement, tout cela nous a permis de calculer un taux de mutation. Nous avons également consulté des données que des radiologues avaient publiées sur le rythme de division des cellules de la tumeur primaire. (Les radiologues avaient

recueilli ces données afin d'évaluer la quantité de rayonnement nécessaire pour détruire une tumeur par radiothérapie.)

Atila Iamarino, à l'époque postdoctorant de mon laboratoire, a utilisé toutes ces informations pour transformer les arbres de phylogénie moléculaire en arbres temporels. Cela nous a donné un premier aperçu de l'évolution génétique du cancer au cours de la vie de patients ayant bénéficié de soins à un stade plus ou moins avancé de leur cancer. Nous avons pu estimer, par exemple, quand était apparue la première mutation ayant différencié les cellules cancéreuses des tissus sains. Chez les jeunes patients, cette divergence s'était produite en général quelques années avant le diagnostic ; chez les patients plus âgés, elle était parfois survenue des décennies plus tôt.

DES RACINES PROFONDES ET UNE PART DE HASARD

Il paraît assez incroyable que la première mutation ayant conduit au cancer survienne des années, voire des décennies avant son diagnostic. Fait tout aussi troublant, chez neuf sujets sur dix, au moins une lignée métastatique avait déjà divergé lors du diagnostic. En fait, dans sept cas, cette branche maligne s'était séparée du tronc de l'arbre plus près de l'origine de la tumeur primaire que de la mort du patient.

Ces observations nous ont frappés. Elles révélaient une information inattendue : il arrive que les cellules bourgeonnant en métastases se différencient génétiquement des autres cellules de la tumeur primaire dès les premiers instants de l'histoire évolutive et temporelle du cancer. Si tôt, en fait, qu'elles divergent avant même que la tumeur primaire ait été diagnostiquée.

En nous lançant dans ces recherches, nous avions espéré identifier des mutations cruciales dans l'apparition des métastases, qui auraient fourni de parfaites cibles pharmacologiques. Mais comme la génétique des lignées métastatiques ne présentait aucune particularité, nous avons dû changer de stratégie. Délaissant les branches de l'arbre, nous nous sommes intéressés au tronc. Et lui, ne jouait-il pas un rôle particulier dans l'apparition du cancer ? Pour répondre à cette question, nous avons examiné si des mutations dans ce tronc concernaient des gènes déjà connus pour jouer un rôle dans le cancer. En d'autres termes, des mutations associées à de tels gènes survenaient-elles tôt dans l'histoire de la tumeur ?

La réponse a été affirmative. Par exemple, chez de nombreux patients, le gène suppresseur de tumeur *p53*, qui inhibe la prolifération des cellules, avait muté très tôt dans l'évolution de leur tumeur, et ce dans divers types de cancer. Il en était de même du proto-oncogène *KRAS* (un proto-oncogène est un gène qui, une fois

muté, devient un oncogène, c'est-à-dire un gène qui amène la cellule à se diviser sans cesse). Notamment, presque tous les patients atteints d'un cancer du pancréas avaient subi une mutation précoce du douzième site du gène *KRAS*.

La présence fréquente de tels gènes clés mutés dans les racines des lignées cancéreuses implique qu'ils participent activement à la formation des tumeurs, ainsi qu'à celle des métastases. Selon nous, à mesure que s'accumulent ces moteurs génétiques de la tumorigenèse, la probabilité de métastase ne devient guère plus qu'un jeu de hasard: plus les cellules cancéreuses sont nombreuses, plus il y a de risques que certaines se retrouvent en un endroit ou adoptent un état épigénétique qui facilitent leur diffusion.

D'autres études sont nécessaires pour déterminer comment les mutations de ces gènes clés influencent les probabilités de tumorigenèse et de métastase. Malgré tout, ces gènes «pilotes» du cancer méritent une attention renouvelée. Les médicaments qui les ciblent pourraient se révéler essentiels tant au début du développement des tumeurs primaires qu'à un stade avancé du cancer.

LES MUTATIONS DES BRANCHES, UNE PISTE POUR COMPRENDRE LA RÉSISTANCE

Des essais cliniques récents ont montré qu'il est possible de débrider le système immunitaire de l'organisme pour qu'il attaque les cellules cancéreuses. Hélas, face à l'immunothérapie comme aux médicaments ciblés, les tumeurs développent avec le temps des formes de résistance. La résistance provient-elle de mutations spécifiques, au même titre que la tumeur initiale? Ou est-ce un symptôme du microenvironnement biologique et d'autres facteurs, comme semblent l'être les métastases? Nous l'ignorons encore, mais les arbres de parenté devraient apporter des réponses.

Nos études sur les arbres temporels ont révélé que certains gènes moins connus, également suspectés de conduire la cancérogenèse, avaient aussi muté, mais que ces altérations avaient tendance à se produire plus tard dans l'histoire de la maladie. Autrement dit, les mutations de ces gènes n'intervenaient pas au niveau du tronc, mais des branches de l'arbre, de sorte qu'elles n'étaient généralement présentes que dans certaines tumeurs du patient. En conséquence, une thérapie dirigée contre de telles mutations tuerait seulement la branche mutée, tandis que le reste de l'arbre cancéreux continuerait à proliférer et à menacer la vie du patient. Il est ainsi important que les oncologues utilisant de tels médicaments

La résistance proviendrait de mutations peut-être liées au traitement suivi

ciblés les complètent par des traitements conçus pour tuer d'autres types de cellules cancéreuses.

D'un autre côté, si un médicament cible une tumeur précoce présente dans tous les tissus cancéreux, une résistance pourrait survenir là aussi en raison de la croissance de cellules dotées de nouvelles mutations. En effet, la pathologiste Katerina Politi, qui travaille à la faculté de médecine de l'université Yale, et ses collègues ont identifié des modifications du gène *EGFR* – un autre facteur majeur de cancer (en particulier dans le poumon) lorsqu'il est muté – qui jouent un rôle important dans le phénomène de résistance. Pour comprendre pourquoi et comment la résistance évolue à mesure que le patient est traité, notre équipe a commencé à utiliser des techniques de la biologie évolutive. Nous calculons actuellement les arbres cancéreux des patients et recherchons des mutations sur les branches qui conduisent à des tissus résistants au traitement, tels qu'une tumeur récurrente. Nos résultats préliminaires sont excitants: ils suggèrent que la résistance proviendrait de changements génétiques qui seraient peut-être liés au type de traitement suivi par le patient.

Chaque année, la palette de médicaments anticancéreux ciblant des mutations spécifiques s'élargit. De plus en plus, les oncologues prescrivent des combinaisons complexes de chimiothérapie traditionnelle, de radiothérapie et d'immunothérapie. Ces spécialistes ne considèrent plus un type de cancer comme une maladie homogène. Chaque cancer qui frappe un individu est une entité propre. À l'avenir, l'étude génomique de patients individuels aura un impact énorme sur les traitements du cancer. Pour utiliser ces nouveaux outils à bon escient, les oncologues devront revêtir l'habit de biologistes de l'évolution. Ils devront apprendre à évaluer la variation génétique présente dans les tissus cancéreux de chaque patient et à concevoir en conséquence une stratégie pour détruire l'arbre du cancer, de la racine aux branches. ■

BIBLIOGRAPHIE

Z.-M. Zhao et al., **Early and multiple origins of metastatic lineages within primary tumors**, *PNAS*, vol. 113(8), pp. 2140-2145, 2016.

W. S. Hong et al., **Inferring the origin of metastases from cancer phylogenies**, *Cancer Research*, vol. 75(19), pp. 4021-4025, 2015.

Cancer : l'arsenal des nouvelles thérapies, *Hors-série Pour la Science*, n° 99, 2018.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

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

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

L'ESSENTIEL

> Il y a environ deux siècles, Joseph Fourier a proposé une méthode puissante pour résoudre l'équation de propagation de la chaleur.

> Cette méthode consiste à représenter une fonction f sous la forme d'une somme de sinusoides, pondérées par des coefficients numériques qui se calculent à partir de f .

> Cet outil mathématique permet de représenter avec une bonne approximation un signal de durée finie à l'aide d'un nombre limité de coefficients.

> Les raffinements successifs de l'analyse de Fourier, notamment avec les représentations par ondelettes, sont au cœur des technologies numériques d'aujourd'hui.

LES AUTEURS



PATRICK FLANDRIN
physicien à l'École
normale supérieure
de Lyon



STÉPHANE JAFFARD
mathématicien
à l'université
Paris-Est Créteil
Val-de-Marne



JEAN-MICHEL
MOREL
mathématicien
à l'École normale
supérieure
Paris-Saclay

L'analyse de Fourier, pilier du numérique

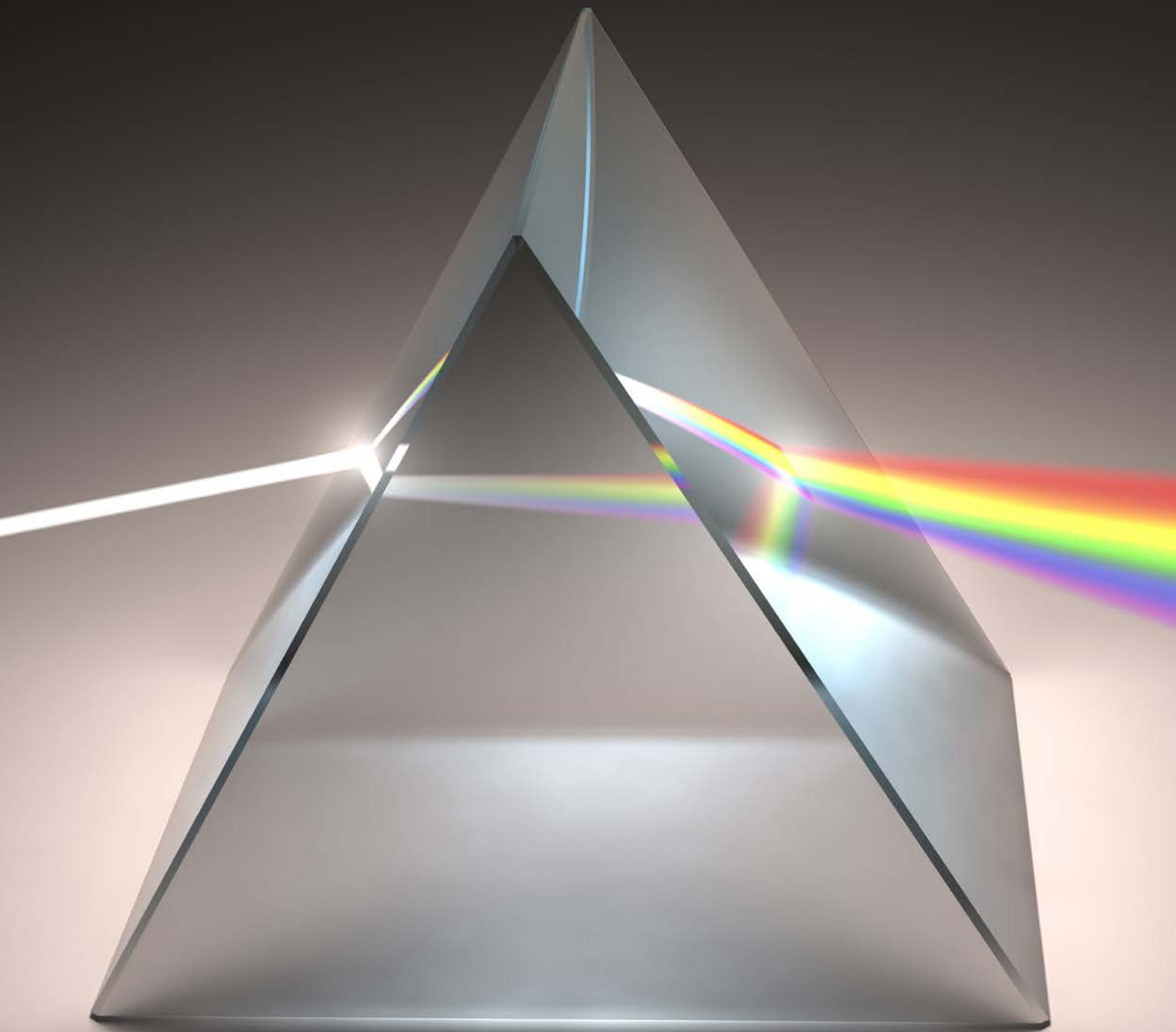
Représenter une fonction ou un signal quelconque sous la forme d'une somme de fonctions élémentaires et aisément calculables : telle est la philosophie qui sous-tend la méthode mathématique mise au point au début du XIX^e siècle par Joseph Fourier. Cet outil universel a connu plusieurs avatars récents qui lui donnent un rôle clé dans la révolution numérique en cours.

De nombreuses commémorations du 250^e anniversaire de la naissance de Joseph Fourier ont jalonné l'année 2018. Ce mathématicien, physicien, administrateur et égyptologue a publié en 1822 un mémoire, intitulé *Théorie analytique de la chaleur*, qui a placé son nom au panthéon de la science. Les méthodes et outils qu'il y introduisait ont constitué une avancée considérable pour la physique mathématique et la physique théorique. Mais leur portée va bien au-delà : les techniques de traitement du signal qui en sont issues sont aujourd'hui utilisées massivement dans toutes les sciences et technologies du numérique, du codage de la voix dans les téléphones portables à la transmission des images par Internet.

En fait, l'«analyse de Fourier» est au cœur de la révolution numérique actuelle. Et même si elle est âgée de plus de deux siècles, elle continue à se développer et se perfectionner, comme nous allons le voir.

L'expression «analyse de Fourier» désigne les méthodes introduites par Fourier pour représenter une fonction quelconque sous la forme d'une somme de fonctions élémentaires. L'idée remonte au XVIII^e siècle et au savant suisse Daniel Bernoulli, qui cherchait à résoudre l'équation régissant la propagation des vibrations le long d'une corde (c'est-à-dire une version de l'équation des ondes, voir la figure page 56).

Dans sa *Théorie analytique de la chaleur*, Fourier développait une théorie décrivant la propagation de la chaleur, et aboutissait à une équation générale à laquelle ce processus obéit. Pour résoudre cette équation, Fourier



Un prisme décompose un faisceau lumineux en ses différentes composantes colorées, chaque couleur correspondant à une onde lumineuse de fréquence bien déterminée. L'analyse de Fourier est un outil mathématique qui réalise une opération tout à fait analogue : il décompose un signal f quelconque (ou presque) en une somme de fonctions sinusoïdales, pondérées par des coefficients dits de Fourier.

entreprit, à la suite de Daniel Bernoulli, de représenter toute fonction $f(x)$ comme une somme (une « série ») de fonctions sinusoïdales, éventuellement en nombre infini : les fonctions du type $\sin(nx)$ où n est un nombre entier positif arbitraire. Il remarqua que quand la répartition initiale de la température est décrite par de telles sinusoïdes, les calculs d'une solution de l'équation de propagation de la chaleur se simplifient considérablement.

L'ATOUT DES FONCTIONS SINUSOÏDALES

L'atout des fonctions sinusoïdales dans ce contexte tient à la conjonction de deux propriétés. La première est que les équations considérées sont « linéaires ». Qu'est-ce que cela signifie ? Les fonctions f qui y jouent le rôle d'inconnues n'apparaissent qu'au premier degré : il n'y a pas de termes comportant une puissance de f autre que 1, par exemple des termes en f^2 ou en $1/f$. Il s'ensuit que ces équations sont linéaires, c'est-à-dire que si l'on a deux fonctions f_1 et f_2 obéissant à l'équation, alors toute fonction de la forme $af_1 + bf_2$, où a et b sont des nombres quelconques, est aussi une solution de cette équation. Cette propriété fondamentale de linéarité se retrouve dans de très nombreuses équations de la physique, au moins quand on décrit les phénomènes en première approximation.

Il s'agit généralement d'équations différentielles (équations où la fonction inconnue intervient avec ses dérivées), et à la linéarité de celles-ci s'ajoute l'autre propriété fondamentale : les fonctions sinusoïdales sont proportionnelles à l'opposé de leur dérivée seconde. En effet, la dérivée seconde (par rapport à x) de $\sin(ax)$ est égale à $-a^2 \sin(ax)$.

Pour illustrer l'intérêt de ces fonctions, supposons que l'on cherche à résoudre l'équation linéaire $f''(x) = \sin(x) + 2\sin(3x)$ (c'est un exemple, à une dimension, d'équation de Poisson) où f'' désigne la dérivée seconde de

Quelques-unes des équations fondamentales de la physique sont indiquées ici dans leur version la plus simple (sans coefficients numériques). Ici, t désigne le temps, x, y, z les coordonnées d'espace, et f représente une fonction $f(x, y, z, t)$ dont la valeur dépend de la position (x, y, z) et de l'instant t . La notation $\partial f / \partial x$ désigne la dérivée (dite partielle) de f par rapport à la variable x , et $\partial^2 f / \partial x^2$ désigne la dérivée seconde de f par rapport à x . Les équations de Laplace et de Poisson interviennent notamment en mécanique des fluides incompressibles et en électrostatique. Comme leur nom l'indique, l'équation des ondes régit la propagation des ondes, et celle de la chaleur régit la propagation de la chaleur. Grâce à la linéarité de ces équations, l'analyse de Fourier permet de les étudier, voire de les résoudre, efficacement.

EQUATION DE LAPLACE

$$\Delta f = 0$$

où Δf désigne le laplacien de f , défini par :

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

EQUATION DE POISSON

(où g est une fonction donnée)

$$\Delta f = g$$

EQUATION DES ONDES

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

EQUATION DE LA CHALEUR

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial t}$$

la fonction inconnue f . On peut alors chercher une solution f de la forme :

$$f(x) = a \sin(x) + b \sin(3x).$$

Comme on a $\sin''(x) = -\sin(x)$ et $(\sin(3x))'' = -9 \sin(3x)$, l'équation devient :

$$f''(x) = -a \sin(x) - 9b \sin(3x) = \sin(x) + 2 \sin(3x).$$

On obtient donc une solution en égalisant les coefficients des sinusoïdes des deux côtés de l'équation, ce qui donne $a = -1$ et $b = -2/9$.

Pour que le procédé puisse s'appliquer de façon générale, il faut démontrer l'universalité de la décomposition en série de sinusoïdes d'une fonction f quelconque, et surtout disposer d'une formule de calcul des coefficients de la décomposition. C'est à cette formule fondamentale que Fourier parvient dans son ouvrage. Si l'on considère une fonction

LA TRANSFORMATION DE FOURIER RAPIDE

Le calcul direct de la transformée de Fourier d'un signal discret de N échantillons (c'est-à-dire défini par la donnée de N valeurs numériques consécutives) nécessite de l'ordre de N^2 opérations, ce qui devient rapidement prohibitif lorsque N est grand. Il existe cependant des algorithmes plus rapides, dits de FFT (pour *Fast Fourier Transform*). Le plus célèbre est celui proposé en 1965 par James Cooley et John Tukey lorsque

N est une puissance de 2. En appliquant récursivement une stratégie faisant porter le calcul sur des séquences de taille moitié, cet algorithme réduit la complexité du calcul à un nombre d'opérations de l'ordre de $N \log_2 N$. Ainsi, on gagne un facteur 32 pour un signal de $N = 256$ échantillons. Le facteur de gain dépasse 4 000 lorsque $N = 65\,536$ (soit 2^{16}) ; il est d'autant plus élevé que N est grand. L'avènement de la FFT a été

fondamental pour la mise en œuvre pratique et à grande échelle de méthodes fondées sur la transformation de Fourier. La FFT est vraisemblablement le second algorithme le plus utilisé au monde, juste après l'algorithme de tri (*Quick sort* ou *Merge sort*) utilisé pour stocker ou récupérer des données dans les mémoires informatiques.

La méthode de Fourier s'applique aussi aux fonctions de plusieurs variables

quelconque (mais suffisamment régulière) $f(x)$ définie sur l'intervalle $[0, \pi]$, elle peut s'écrire sous la forme :

$$f(x) = a_0 + a_1 \sin x + a_2 \sin(2x) + \dots + a_n \sin(nx) + \dots$$

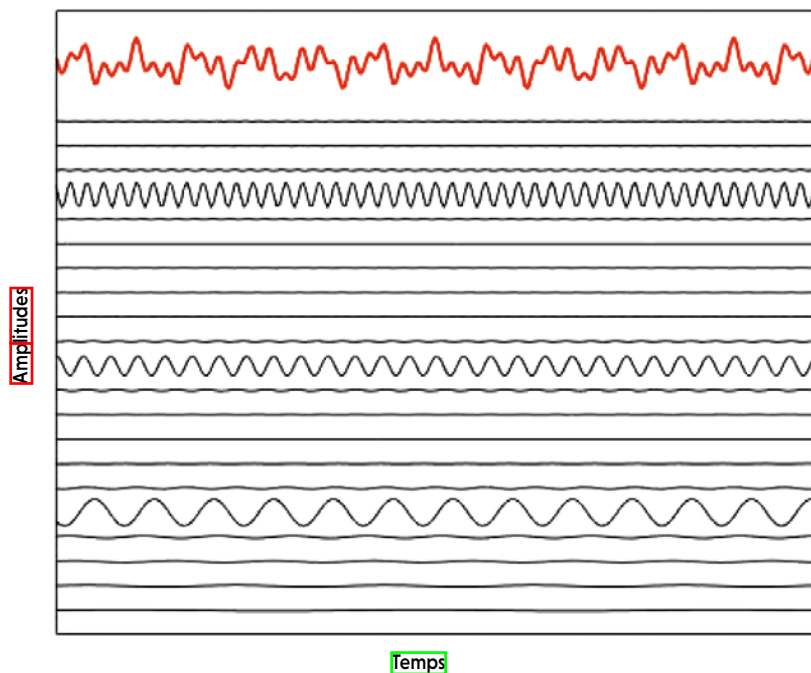
Dans cette représentation de f par une «série de Fourier», chaque coefficient s'obtient par une simple formule intégrale :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi f(x) \sin(nx) dx$$

Le tracé en rouge représente une fonction périodique. Sa décomposition de Fourier (tracés noirs) montre qu'elle est principalement constituée de la somme de trois oscillations sinusoïdales. Les autres oscillations sinusoïdales qui composent le signal sont de faible amplitude et négligeables : on peut donc représenter avec une très bonne précision la fonction périodique en question à l'aide de seulement trois coefficients de Fourier (et des trois fréquences des oscillations correspondantes).

Cette formule explicite le n -ième coefficient de la fonction $f(x)$ sur la base constituée par les fonctions élémentaires $\sin(nx)$. On l'interprétera plus tard comme le calcul d'un «produit scalaire» entre la fonction $f(x)$ et l'élément $\sin(nx)$ de la base de Fourier. En effet, dans ce contexte, un produit scalaire entre deux fonctions f et g définies sur $[0, \pi]$ peut être défini par la formule :

$$(f, g) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi f(x) g(x) dx$$



Et l'on montre aisément que la base formée par les fonctions $\sin(nx)$ est orthonormée, c'est-à-dire que le produit scalaire de $\sin(mx)$ et de $\sin(nx)$ est égal à 0 si $m \neq n$, et égal à 1 si $m = n$. Autrement dit, la représentation de f par une série de Fourier revient à exprimer un vecteur f à l'aide d'une base orthonormée constituée des vecteurs $\sin(nx)$, qui sont de norme unité et orthogonaux entre eux.

Ces considérations et formules s'étendent sans difficulté (moyennant des modifications des divers facteurs numériques qui interviennent dans les expressions) à des fonctions définies sur un autre intervalle que $[0, \pi]$, ainsi qu'à des fonctions de plusieurs variables. Fourier a d'ailleurs utilisé ces outils pour représenter le champ de température $T(x, y, z)$ dans un solide.

La représentation de Fourier se généralise aussi à des fonctions définies sur tout l'ensemble des nombres réels. Dans ce cas, elle prend la forme d'une intégrale, et non d'une somme discrète, et on la dénomme transformée de Fourier.

UNE THÉORIE RENDUE RIGOUREUSE TARDIVEMENT

Fourier affirmait sans preuves valables que la représentation par des sinusoides et les formules correspondantes s'appliquaient à des fonctions quelconques. Il faut dire qu'au début du XIX^e siècle, de nombreux concepts de l'analyse mathématique, tels que la notion de fonction ou celle de limite, n'avaient pas de définitions suffisamment précises pour que l'on puisse fournir des démonstrations rigoureuses.

Une bonne partie des développements de l'analyse jusque dans les années 1960 auront pour objectif de préciser dans quelles conditions et dans quel sens la série de Fourier d'une fonction f , calculée à partir des formules de Fourier, peut représenter cette fonction f . En effet, la somme d'une infinité de nombres n'a de sens que si elle converge, c'est-à-dire si la somme des n premiers termes tend vers une limite finie quand n tend vers l'infini. Or le théorème de Carleson, qui prouve rigoureusement que la série de Fourier d'une fonction $f(x)$ de carré intégrable (c'est-à-dire une fonction f dont l'intégrale de f^2 existe et donne un résultat fini) converge pour presque tout x vers $f(x)$, ne date que de 1966.

Pourquoi la représentation d'une fonction par une série de Fourier est-elle si utile ? Tout d'abord, elle montre qu'on peut reconstruire une fonction quelconque (mais suffisamment régulière) définie sur un intervalle borné à partir d'un objet beaucoup plus simple, à savoir la suite discrète de ses coefficients de Fourier.

Ensuite, on démontre que ces coefficients a_k tendent rapidement vers zéro quand

➤ k tend vers l'infini; il s'ensuit qu'on peut ne garder qu'un nombre fini, disons les n premiers coefficients, pour reconstruire la fonction avec peu d'erreur. En effet, le reste de la série de Fourier, c'est-à-dire la somme de tous les termes négligés $a_k \sin(kx)$, d'indices supérieurs à n , tend vers zéro quand n tend vers l'infini. Autrement dit, on peut représenter avec une bonne approximation toute fonction par un nombre fini de coefficients de Fourier. En termes modernes, cela signifie que l'on peut « numériser » efficacement la fonction, qui est alors représentée par un ensemble fini de nombres.

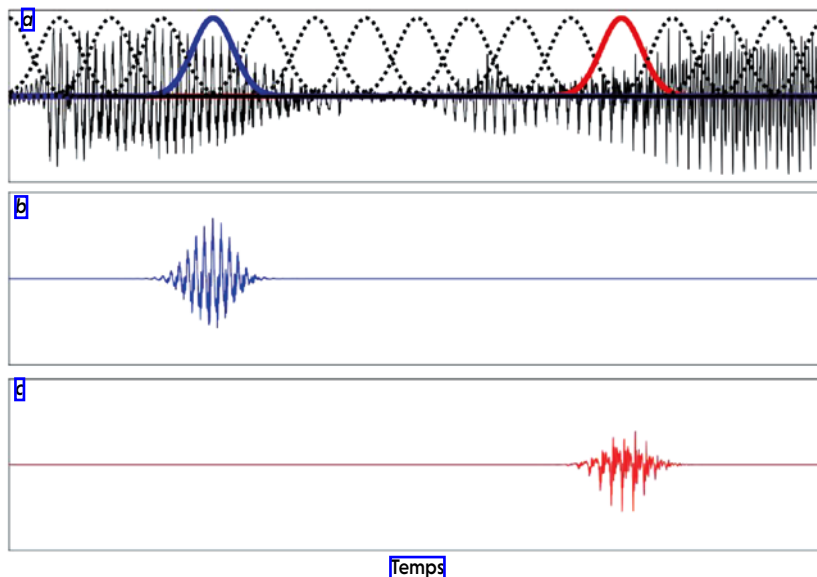
Ainsi, on peut représenter avec une bonne approximation un signal temporel $f(t)$ sur une durée finie par la somme d'un nombre fini de signaux sinusoïdaux de la forme $a_k \sin(\alpha k t)$ où k est un entier positif et α une constante qui dépend de la durée sur laquelle le signal est défini. Cela correspond à une décomposition du signal en ses principales fréquences (la fonction $\sin(\alpha k t)$ a une fréquence $\alpha k / (2\pi)$) (voir la figure page 57). L'ensemble des fréquences représentées dans la série de Fourier de la fonction $f(t)$ définit ce qu'on appelle le spectre de f , par analogie avec le spectre de la lumière blanche, qu'un prisme décompose en composantes colorées, de fréquence bien déterminée (voir la figure page 55).

RÉSOLVER DES ÉQUATIONS, RETOUCHER DES IMAGES...

Comme nous l'avons vu sur un exemple, la représentation en sommes de sinus (ou de cosinus, ou, de façon plus générale, d'exponentielles complexes, de la forme $e^{iax} = \cos ax + i \sin ax$ où i est le nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$) permet de résoudre, dans toutes sortes de cas que Fourier a détaillés dans son traité, non seulement l'équation de la chaleur, mais aussi les principales équations linéaires de la physique.

La méthode de Fourier, souvent très efficace, trouve régulièrement de nouvelles applications. Par exemple, en 2003, Patrick Pérez, Michel Gangnet et Andrew Blake, alors chercheurs chez Microsoft au Royaume-Uni, ont proposé une méthode, nommée édition de Poisson, pour pratiquer le copier-coller d'une image dans une autre. Elle est aujourd'hui mise en œuvre dans tous les logiciels de retouche d'images.

Les trois chercheurs parlaient de l'observation que l'on ne peut pas juste copier-coller brutalement un morceau d'une image I_1 dans une autre image I_2 : en effet, le bord de la zone copiée se détecterait immédiatement, car les couleurs de l'image cible I_2 et du morceau collé extrait de I_1 sont généralement différentes. Pour faire une retouche « sans couture », l'idée est de fusionner non pas les deux images, mais



Dans les analyses de Fourier locales, le signal est découpé en courts segments sur lesquels les caractéristiques spectrales sont considérées comme homogènes. Pour ce faire, on utilise une fenêtre « douce » qui glisse sur le signal et prélève sur celui-ci des segments pondérés et partiellement recouvrants. Ainsi, pour effectuer une analyse du signal représenté en a , on peut envisager un ensemble de fenêtres locales telles celles représentées en pointillés, dont chacune permet d'isoler une partie du signal (b et c). L'analyse de Fourier est ensuite appliquée à chacun des fragments de signal ainsi isolés.

leurs gradients, en créant un champ de vecteurs V qui est égal au gradient de la première image I_1 sur la zone à coller et au gradient de l'image cible I_2 ailleurs. Rappelons que le gradient d'une fonction $f(x, y)$, qui décrit l'image, est le champ de vecteurs du plan dont les composantes sont la dérivée $\partial f / \partial x$ de f selon la coordonnée x et la dérivée $\partial f / \partial y$ selon la coordonnée y . Or on montre que reconstruire une image f dont le gradient soit aussi proche que possible du champ V revient à résoudre une équation de Poisson, ce que des algorithmes fondés sur la méthode de Fourier effectuent très rapidement.

En fait, dès le XIX^e siècle, la résolution de nombreux problèmes, notamment les prévisions astronomiques, s'est effectuée par la méthode de Fourier, en calculant des coefficients d'une série de Fourier. Ce faisant, des méthodes rapides pour effectuer ces calculs seront redécouvertes plusieurs fois. Elles anticipaient l'invention en 1965 par les Américains James Cooley et John Tukey de la transformation de Fourier rapide ou FFT, pour « Fast Fourier Transform » (voir l'encadré page 56).

À la fin des années 1940, l'apparition des premiers ordinateurs a fait naître une nouvelle discipline, le traitement du signal, qui utilise la numérisation des sons et des images pour leur faire subir des transformations visant à en améliorer la qualité (par exemple en enlevant des bruits parasites) ou à les transmettre efficacement. Les méthodes de l'analyse de Fourier y ont très vite rencontré un immense succès, dû au fait que la plupart des signaux et images sont

représentés de façon économique par une série de Fourier. En effet, la transmission d'un petit nombre de coefficients suffit pour reconstituer le signal avec une grande précision; de plus, les bruits parasites correspondent souvent, dans la série de Fourier, à des termes dont les coefficients ont une faible valeur, et il est donc plus facile de les éliminer en utilisant la représentation de Fourier.

Cependant, si l'on s'en tient à sa formulation initiale, la représentation de Fourier souffre de limitations dans bon nombre de situations. Une représentation en termes de fonctions sinusoïdales est *a priori* bien adaptée pour décrire un signal présentant des oscillations permanentes. Mais dans des cas moins « stationnaires » (signaux transitoires, modulations de fréquence, etc.), la description qu'elle offre peut s'écarter sensiblement du signal réel.

Si l'on s'en réfère à une analogie musicale, on peut voir un mode de Fourier (c'est-à-dire

une oscillation sinusoïdale) comme une note de musique dont la hauteur correspond à la fréquence de ce mode. Ce point de vue se heurte cependant au fait qu'un tel mode est par définition éternel alors que, dans tout morceau de musique, les notes que l'on entend sont localisées dans le temps.

DÉCOUPER LE SIGNAL EN COURTS SEGMENTS TEMPORELS

Dépasser cette limitation a fait l'objet de nombreux travaux depuis les années 1940. On a ainsi cherché à mettre au point une analyse de Fourier « locale » qui réaliserait mathématiquement ce qu'on lit sur une portée musicale. En d'autres termes, il s'agissait d'obtenir une « représentation temps-fréquence », permettant de lire, pour chaque intervalle de temps donné, les fréquences représentatives du signal.

La solution la plus simple consiste à découper le signal en courts segments temporels successifs et à appliquer une analyse de Fourier classique sur chacun d'eux (voir l'encadré ci-contre). Cependant, une découpe simple, mais brutale, du signal en segments adjacents crée parfois des artefacts. Afin de les limiter, une meilleure analyse de Fourier locale fait usage de fenêtres qui sont à la fois pondérées et partiellement recouvrantes (voir la figure page précédente).

On obtient ainsi une représentation régulière et d'interprétation visuelle aisée. Mais elle n'est pas totalement satisfaisante sur le plan de l'efficacité algorithmique, car elle est redondante: les spectres calculés sur chaque fenêtre ne sont pas indépendants. Le codage de l'information n'est donc pas optimal et l'inversion de la transformation, qui permet de reconstituer le signal à partir de sa représentation de Fourier, est rendue plus difficile.

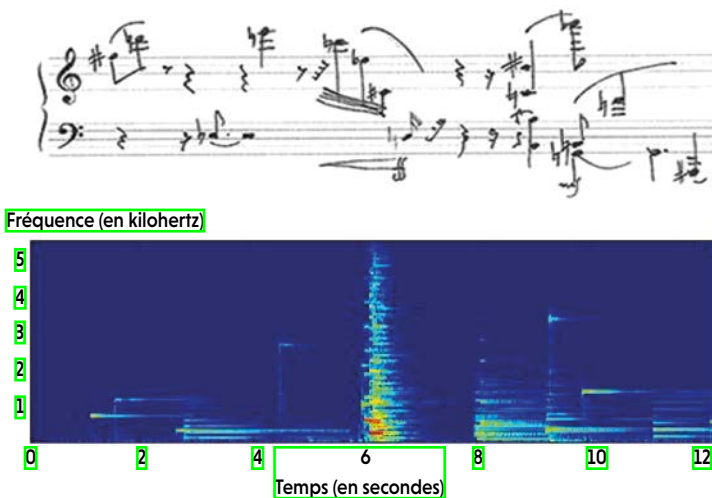
Plusieurs pistes ont été suivies pour pallier ces difficultés et trouver de véritables bases temps-fréquence orthonormées (des familles de fonctions indépendantes permettant une description du signal sans perte d'information ni redondance) pouvant être associées à des algorithmes rapides d'analyse et de synthèse.

L'existence de telles bases a longtemps été tenue pour impossible, car elle semblait contredire certains résultats théoriques en physique mathématique. Ce n'est qu'au début des années 1990 qu'ont été développées des méthodes satisfaisantes telles que la MDCT (pour *Modified Discrete Cosine Transform*), aujourd'hui largement utilisée pour les formats de compression audio numérique (MP3, MPEG2-AAC).

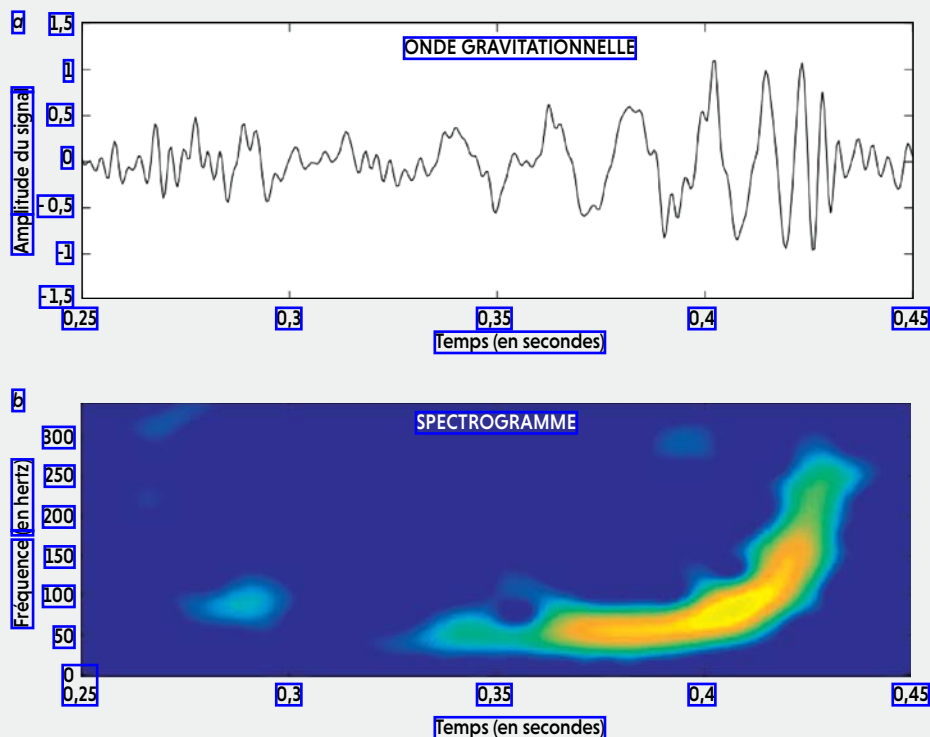
Les « bases de Wilson » en sont une variante. Inspirées d'une idée du physicien américain Kenneth Wilson (lauréat du prix Nobel en 1982), les bases de Wilson ont

REPRÉSENTATION TEMPS-FRÉQUENCE

Dans sa version de base, l'analyse de Fourier représente un signal temporel $f(t)$ par un spectre fréquentiel qui ne dépend pas du temps: les modes de Fourier – les fonctions sinusoïdales comme $a_n \sin(nt)$ – sont supposés établis de façon permanente, avec des poids a_n constants. Afin de rendre l'analyse évolutive et plus fine, on peut segmenter le signal en courts intervalles de temps successifs et appliquer l'analyse de Fourier sur chacun de ces intervalles. On parle alors de « transformée de Fourier à court terme » et la représentation dite temps-fréquence qui en résulte est l'analogue de l'écriture d'un morceau musical sur une portée (voir la figure): pour chaque intervalle de temps, on obtient un ensemble de fréquences (les notes en musique) représentatives du signal.



Un peu comme les portées d'une partition musicale (en haut), une analyse de Fourier à court terme du morceau de musique représente celui-ci sur un diagramme temps-fréquence (en bas). L'intensité étant codée par la couleur (du bleu foncé pour les faibles valeurs au rouge pour les plus grandes), cette représentation permet d'identifier les notes par leur hauteur, l'instant de leur occurrence et leur poids énergétique.



La première détection directe d'une onde gravitationnelle a été réalisée en 2015 par le dispositif interférométrique *Ligo*, aux États-Unis. Elle a nécessité une analyse efficace du signal. Cette analyse est effectuée par une décomposition de Fourier locale avec des fenêtres « douces » (voir la figure page 58), le signal de chaque fenêtre étant décomposé sur une base de Wilson (une famille particulière de fonctions). Le signal brut (a) qu'a recueilli l'interféromètre est constitué d'une bouffée bruitée d'oscillations dont la fréquence s'accélère au fil du temps. Sa représentation temps-fréquence (b) montre que l'énergie du signal (codée par la couleur) se concentre sur une trajectoire relativement bien définie dans le plan temps-fréquence. En ne retenant dans cette représentation que les composantes dominantes, il est possible de débruiter le signal (c, courbe rouge), qui correspond alors remarquablement bien au calcul théorique d'un signal gravitationnel dû à la coalescence de deux trous noirs (c, courbe noire).

Il a récemment joué un rôle clé dans la première détection directe d'une onde gravitationnelle, en 2015 (voir la figure pages 60 et 61).

DÉTECTION D'ONDES GRAVITATIONNELLES

L'exemple de la détection des ondes gravitationnelles est emblématique de la capacité d'une description temps-fréquence à mettre en évidence, en présence de bruit, un signal transitoire de type *chirp*. Ce terme, qui signifie « pépiement » en anglais, désigne un signal transitoire de la forme $a(t) \sin b(t)$ où les variations de l'amplitude $a(t)$ sont lentes par rapport aux oscillations décrites par le terme $\sin b(t)$. Avec une représentation temps-fréquence par une base de fonctions orthonormées, le gros de l'énergie d'un tel signal transitoire correspond à quelques coefficients forts, tandis que d'éventuels bruits parasites se répartissent sur de petits coefficients, répartis sur l'ensemble du plan temps-fréquence.

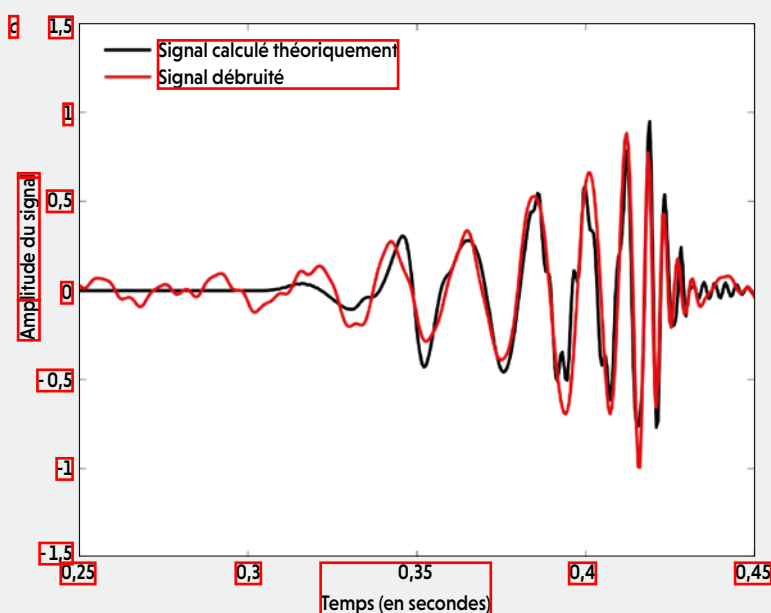
La détection directe d'une onde gravitationnelle est effectuée par une interférométrie optique très sensible, mise en œuvre dans les immenses dispositifs de la collaboration *LIGO-Virgo*, dont les concepteurs ont reçu le prix Nobel de physique en 2017. En effet, avec un interféromètre suffisamment grand, le passage d'une onde gravitationnelle se traduit par une légère modification de la longueur d'un des deux bras du dispositif par rapport

à l'autre. Le système des franges d'interférence observées oscille donc. Dans le cas de la première détection, survenue le 14 septembre 2015, la source d'ondes gravitationnelles était l'effondrement d'un système de deux trous noirs en rotation l'un autour de l'autre. Cette rotation s'accélère lors de la phase ultime précédant la coalescence des deux astres, avec pour conséquence une augmentation de la fréquence de l'oscillation des franges d'interférence. Le signal mesuré a alors une structure de *chirp*.

La représentation temps-fréquence d'un tel *chirp* est dite parcimonieuse, au sens où elle n'est constituée que d'un petit nombre de coefficients significatifs, ses contributions principales s'organisant le long de la trajectoire d'évolution de la fréquence. La théorie prédit que cette fréquence se comporte en première approximation comme $t^{-3/8}$, où t est le temps. Cela facilite l'identification du signal et son débruitage, et le résultat se compare remarquablement bien avec la prédiction de la théorie de la relativité générale (voir la figure ci-dessus).

DES ONDELETTES POUR FENÊTRES VARIABLES

L'analyse temps-fréquence est cependant limitée par l'utilisation d'une fenêtre de largeur fixe. Elle n'est donc pas adaptée aux signaux ou images dépourvus d'échelle caractéristique, qui présentent des détails à toutes les échelles.



C'est typiquement le cas des images naturelles, en raison de l'effet de perspective.

Il en est de même pour certains signaux sismiques utilisés en prospection pétrolière. La technique de « sismique réflexion » consiste à produire une vibration à la surface du sol, qui se propage dans le sous-sol tout en étant réfléchi par les multiples couches qui le composent. Les géophysiciens cherchaient à déduire des informations sur la nature de ces couches, et notamment la présence éventuelle de pétrole, à partir d'une analyse du signal réfléchi. Or pour de tels signaux, l'analyse temps-fréquence se révélait inefficace : elle ne permettait pas d'analyser les détails du signal plus petits que la largeur de la fenêtre.

Dans les années 1980, le géophysicien français Jean Morlet a ainsi été conduit à abandonner l'analyse temps-fréquence pour introduire l'analyse par « ondelettes ». Il s'agit de décomposer le signal sous la forme d'une somme de versions translatées et dilatées d'une seule fonction oscillante et bien localisée, à choisir de façon appropriée.

En collaboration avec le physicien théoricien Alex Grossmann, Jean Morlet introduisit la première variante d'une décomposition en ondelettes. Il s'agissait d'une transformation qui décompose un signal $f(t)$ en termes de toutes les translatées-dilatées d'une certaine ondelette $\psi(t)$, c'est-à-dire de toutes les fonctions de la forme $\psi((t-b)/a)$, où a , le paramètre de dilatation, prend toutes les valeurs positives et b , le paramètre de translation, prend toutes les valeurs réelles.

DES BASES D'ONDELETTES SANS REDONDANCE

Cependant, ce système de représentation était très redondant et donc peu efficace. C'est ici qu'intervint Yves Meyer. En 1986, ce mathématicien français (lauréat du prix Gauss en 2010 et du prix Abel en 2017) montra que, pour certains choix de l'ondelette ψ , une famille de translatées-dilatées particulières conduit à une base de fonctions orthonormées, qui permettent donc de représenter le signal sans redondance.

Les progrès se sont alors enchaînés rapidement. Stéphane Mallat, aujourd'hui professeur au Collège de France, établit le lien avec des algorithmes de décomposition utilisés en analyse d'images, et introduisit les algorithmes de décomposition rapides, indispensables pour les applications techniques. En 1988, Ingrid Daubechies, physicienne et mathématicienne d'origine belge, construisit des ondelettes à support compact (c'est-à-dire des fonctions nulles en dehors d'un intervalle de taille finie), qui autorisent une meilleure efficacité algorithmique. Le standard de compression professionnel des photographies de haute définition utilisé aujourd'hui, JPEG 2000, est fondé sur des décompositions de ce type (voir la figure page 62).

Les décompositions en ondelettes ont connu un succès très rapide en traitement du signal et des images. En effet, pour de vastes classes de signaux, elles donnent lieu à des décompositions parcimonieuses, où ne figurent qu'un petit nombre de coefficients. De telles représentations rendent possible une très forte compression des données, sans réelle perte d'information. Cette propriété est importante non seulement pour transmettre rapidement et efficacement des données, mais aussi pour éliminer les bruits parasites : un algorithme performant consiste simplement à

Les ondelettes ont connu un succès très rapide en traitement du signal et des images



JPEG



JPEG2000



annuler les plus petits coefficients dans la décomposition du signal en ondelettes. La théorie statistique qui justifie et développe cela a été mise au point par David Donoho (lauréat du prix Gauss en 2018), de l'université Stanford, et ses collègues.

De façon générale, les développements de l'analyse de Fourier sont au cœur de l'actualité scientifique et technique. Ils interviennent partout dans le traitement de données vocales ou musicales, où la séparation des sources et leur caractérisation s'appuient sur l'identification de motifs spectraux et de leurs occurrences au fil du temps.

En ingénierie biomédicale, la détection de signatures temps-fréquence caractéristiques dans des enregistrements de signaux ou d'images dans différentes modalités (électroencéphalographie, électrocardiographie, magnétoencéphalographie...) peut être associée à diverses pathologies.

UNE APPROCHE QUI NE CESSE DE SE RENOUVELER

Plus fondamentalement, l'une des techniques d'apprentissage profond les plus récentes, la «transformée de scattering», développée par Stéphane Mallat et ses collègues, peut être interprétée comme une variante des

La norme JPEG de compression d'images, créée en 1992 par le collectif d'experts nommé Joint Photographic Experts Group, est d'un usage très répandu. Elle utilise une représentation des images à base de fonctions cosinus (DCT, pour *Discrete Cosine Transform*). En 2000, a été proposée la norme JPEG 2000, qui utilise une compression à base d'ondelettes. Comme le montrent ces images (décompressées), la compression JPEG 2000 offre une qualité bien meilleure que la norme JPEG initiale, pour une même taille de fichier.

techniques des réseaux de neurones profonds, où l'on calcule des itérées de la transformée en ondelettes. Elle et ses variantes ouvrent la voie à de nouveaux algorithmes de classification de sons ou d'images.

On peut noter enfin que la théorie récente de l'«acquisition comprimée», ou *compressed sensing* en anglais, introduite par Emmanuel Candès, Justin Romberg, Terence Tao et David Donoho, parvient à exploiter le fait qu'un signal ayant une représentation parcimonieuse dans une base bien choisie (ce qui est le cas avec les ondelettes pour la plupart des données naturelles) peut être acquis au moyen d'un très petit nombre d'échantillons. Cette théorie trouve actuellement des applications importantes en imagerie médicale: on a ainsi pu réduire de façon spectaculaire le temps nécessaire pour effectuer une IRM.

Ainsi, l'approche proposée par Fourier ne cesse de se renouveler sans rien perdre de ses principes fondateurs. Deux siècles plus tard, elle reste d'une étonnante actualité. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Chassande-Mottin et al., **Des ondelettes pour détecter les ondes gravitationnelles**, *Gazette des Mathématiciens*, n° 148, pp. 61-64, mars 2016.

T. Butz, **Fourier Transformation for Pedestrians**, Springer, 2^e édition, 2015.

B. B. Hubbard, **Ondes et ondelettes - La saga d'un outil mathématique**, *Pour la Science*, 1995.

Y. Meyer et al., **L'analyse par ondelettes**, *Pour la Science*, septembre 1987, pp. 28-37.

tables rondes

16, 23 et 30 janvier 2019 à 19h

Que peuvent nous apporter la recherche et l'innovation technologique en chimie dans trois domaines de la vie quotidienne : l'alimentation, le bien-être et les médicaments ?

Avec

Mathilde Touver, Inserm ; Nadine Vallet, Institut supérieur international du parfum ; Françoise Weber, Agence nationale de sécurité sanitaire ; Laurence Coiffard, université de Nantes ; Patricia Pineau, revue *L'Actualité chimique* ; Patrice Revillard, parfumeur indépendant chez Maelstrom ; Jacques Vaillant, Société française des parfumeurs ; Ali Al-Mourabit, Institut de chimie/CNRS ; Arnaud Bedin, Sanofi-Aventis ; Hélène Budzinski, CNRS, université Bordeaux-I ; François Chast, hôpitaux universitaires Paris-centre ; Christelle Ratignier-Carbonneil, Agence du médicament.

EN PARTENARIAT AVEC



Fondation de la Maison de la Chimie

AVEC LE SOUTIEN DE

POUR LA SCIENCE

naturellement chimiques...

tables rondes accès gratuit

— les mercredis à 19h

Palais
DÉCOUVERTE

©Agetafotostock

nuits des idées : face au présent

événement mondial accès gratuit

jeudi 31 janvier
— de 19h à 23h

Palais
DÉCOUVERTE

tables rondes

À l'occasion de la Nuit des idées 2019, le Palais de la découverte propose une série de débats. Des mutations technologiques, sociales, environnementales, géopolitiques, que l'on pensait relever d'un avenir lointain, font désormais partie de notre quotidien et appellent de nouvelles adaptations. Quels en sont les enjeux et comment les tenir ?

Venez en discuter avec des scientifiques et philosophes.

EN PARTENARIAT AVEC



INSTITUT FRANÇAIS



AVEC LE SOUTIEN DE

POUR LA SCIENCE

©Jeffrey Hamilton

Le triomphe improbable des dinosaures

L'histoire était entendue : à leur apparition, les dinosaures avaient vite surpassé les autres vertébrés. Faux, indiquent de nouveaux fossiles. Rien ne prédestinait les terribles lézards à devenir les maîtres du Mésozoïque.

Dromomeron, un précurseur des dinosaures, s'approche prudemment de l'eau pour boire, il y a 212 millions d'années, dans une oasis de l'actuel Nouveau-Mexique. *Koskinonodon*, un amphibien géant, est à l'affût. La vie n'était pas simple à l'époque pour les ancêtres des dinosaures...



L'ESSENTIEL

> Selon la vision classique en paléontologie, les dinosaures étaient dotés dès leur origine d'une vitesse, d'une agilité, d'un métabolisme et d'une intelligence tels qu'ils ont vite dominé tous leurs compétiteurs et colonisé l'intégralité du globe.

> De nouvelles découvertes et analyses de fossiles contredisent ce scénario. En réalité, les dinosaures ont peu évolué à leurs débuts. Il a fallu des dizaines de millions d'années pour qu'ils surpassent leurs rivaux et conquièrent la planète.

L'AUTEUR



STEPHEN BRUSATTE
paléontologue à l'université d'Édimbourg, en Écosse

Quand j'étais adolescent, au tournant du millénaire, à peu près au même moment où la passion des fossiles a commencé à me dévorer, le musée Field d'histoire naturelle, à Chicago, a démantelé son brachiosaure et installé à la place un *Tyrannosaurus rex*. En somme, l'établissement échangeait un dinosaure iconique pour un autre. Adieu le colosse herbivore pesant le poids de plus de dix éléphants, dont le cou s'élevait gracieusement bien au-delà de la galerie du deuxième étage. Désormais les spectateurs frissonneraient devant le prédateur le plus grand et le plus féroce de tous les temps : une brute de la taille d'un bus avec des rangées de dents en pointe capables de briser les os de ses proies.

Ces deux monstres ont enflammé mon imagination. Comme j'habitais à 120 kilomètres de Chicago par la route, au milieu d'une plaine du Midwest couverte de champs de maïs et de haricots, je leur rendais visite aussi souvent que j'arrivais à convaincre mes parents de faire le trajet. Leurs squelettes m'hypnotisaient : tout était différent chez eux par rapport aux animaux modernes, leur taille, leur puissance, leur corps... Presque des extraterrestres à mes yeux. Pas étonnant que la lignée des dinosaures ait gouverné la Terre pendant plus de 150 millions d'années. Ils étaient majestueux.

Mais comment les dinosaures étaient-ils apparus ? Par quel chemin de l'évolution ? Je m'attardais rarement sur cette question pendant ces années d'obsession. De même qu'il m'était difficile d'imaginer que mes parents avaient eu un jour mon âge, j'avais juste supposé que les dinosaures s'étaient matérialisés dans un lointain passé sous la forme de géants au long cou et aux dents acérées. Je l'ignorais à l'époque, mais cette vision naïve n'était pas si éloignée du consensus scientifique régnant à la fin du xx^e siècle. Les paléontologues s'entendaient sur le fait que la vitesse, l'agilité et le métabolisme des dinosaures étaient si

exceptionnels qu'ils avaient dû facilement surclasser leurs premiers rivaux et se rendre maîtres de toute la planète.

Cependant, au cours des quinze dernières années, de nouveaux éléments ont ébranlé ce scénario. Une profusion de fossiles, ajoutés à une meilleure connaissance du monde physique des premiers dinosaures et des filiations entre espèces, mais aussi de nouvelles méthodes d'analyse des tendances évolutives ont revisité cette théorie et nous racontent une autre histoire : l'apparition des dinosaures a été graduelle et, pendant leurs trente premiers millions d'années, ces animaux n'ont vécu que dans quelques coins du monde, dépassés par d'autres espèces. C'est seulement grâce à quelques coups de chance qu'ils ont pu coloniser davantage d'espace et devenir les maîtres de la planète.

DES TRACES ÉTRANGES EN POLOGNE

Comme de nombreuses espèces au cours de l'évolution, les dinosaures sont nés d'une catastrophe. Il y a 252 millions d'années, à la toute fin de la période géologique du Permien, une poche de magma a commencé à gronder sous la Sibérie. Les animaux vivant en surface – une ménagerie exotique formée de grands amphibiens, de reptiles à la peau bosselée et de carnivores précurseurs des mammifères – n'avaient aucune idée du cataclysme en préparation. Des coulées de roche liquide se sont frayé un chemin à travers le manteau terrestre puis la croûte, avant de s'écouler en surface par des fissures de dimension kilométrique. Pendant des centaines de milliers, voire des millions d'années, les éruptions ont continué, crachant de la chaleur, de la poussière, des gaz nocifs et assez de lave pour ennoyer plusieurs millions de kilomètres carrés du paysage asiatique. L'élévation des températures, l'acidification des océans et l'effondrement des écosystèmes comptèrent parmi les conséquences. Jusqu'à 95% des espèces du Permien périrent. Ce fut la plus effroyable extinction

d'espèces de l'histoire de la Terre (l'événement marqua l'entrée dans le Trias, la période géologique qui a succédé au Permien).

Mais une poignée de survivants s'en étaient sortis. Lorsque les volcans se calmèrent et les écosystèmes se stabilisèrent, ces animaux miraculés se retrouvèrent dans un monde en grande partie vide. Parmi eux figuraient divers petits amphibiens et reptiles, qui se diversifièrent à mesure que la Terre reprenait vie et qui, plus tard, engendreraient les grenouilles, salamandres, tortues, lézards et les mammifères que nous connaissons.

Les traces de ces animaux ne sont pas des fossiles proprement dits, mais des empreintes de pattes découvertes dans les monts Sainte-Croix, en Pologne, dans des couches de sédiments fluviaux et lacustres. Pendant plus de vingt ans, Grzegorz Niedźwiedzki, qui a grandi dans ces collines et est aujourd'hui paléontologue à l'université d'Uppsala, en Suède, a méticuleusement collecté les traces, parfois avec moi. En 2005, alors qu'il prospectait près du village de Stryczowice, le long d'un ruisseau étroit entrecoupé de ronces, Grzegorz Niedźwiedzki mit au jour un type inhabituel de traces qui ne semblaient correspondre à aucun reptile ou amphibien commun. De la taille de pattes de chat et alignées en pistes étroites, les empreintes montraient les sillons de trois orteils centraux flanqués d'un bourgeon d'orteil de chaque côté. Ces caractéristiques les classaient parmi les *Prorotodactylus*, un genre décrit en 2000, lui aussi sur la seule base d'empreintes.

Les traces de *Prorotodactylus* dataient d'environ 250 millions d'années, soit 1 ou 2 millions d'années après les éruptions volcaniques qui ont mis fin au Permien. D'emblée, d'après le faible écart séparant les empreintes gauches et droites, il était clair qu'elles se rattachaient à un groupe spécifique de reptiles, les archosaures, qui étaient apparus après l'extinction

Les premiers dinosauiromorphes avaient la taille d'un chat et de longues jambes maigres

Des empreintes fossiles de *Prorotodactylus* montrent qu'il y a environ 250 millions d'années des précurseurs des dinosaures – des dinosauiromorphes – ont foulé le sol des actuels monts Sainte-Croix, en Pologne.

du Permien et étaient dotés d'une innovation évolutive: une posture dressée qui les aidait à courir plus vite, à couvrir des distances plus longues et à traquer leurs proies avec davantage d'agilité. Cela signifiait qu'elles fourniraient peut-être des indices sur les origines des dinosaures. En effet, peu après leur apparition, les archosaures se sont séparés en deux lignées majeures qui, jusqu'à la fin du Trias, n'ont cessé de s'affronter dans une course évolutive aux armements: les pseudosuchiens, qui ont conduit aux crocodiles modernes, et les avemetatarsaliens, qui ont mené aux dinosaures. Dans quelle branche *Prorotodactylus* se rangeait-il?

DES PRÉCURSEURS PETITS ET RAPIDES

Pour le savoir, j'ai mené une étude avec Grzegorz Niedźwiedzki et Richard Butler, maintenant à l'université de Birmingham, en Angleterre. Notre analyse des empreintes, publiée en 2011, a révélé deux particularités qui les relient aux caractéristiques du pied des dinosaures: d'une part, une marche «digitigrade», où seuls les orteils entrent en contact avec le sol lors de la marche (et non le pied entier) et, d'autre part, des pieds étroits qui ne comportent que trois orteils principaux. *Prorotodactylus* est donc un dinosauiromorphe: ce n'est pas un dinosaure au sens strict, mais un membre primitif du sous-groupe des avemetatarsaliens, qui inclut les dinosaures et leurs plus proches cousins. Les membres de ce groupe avaient une longue queue, de puissantes jambes et des hanches dotées d'os supplémentaires qui reliaient les cuisses au tronc, ce qui leur permettait de se déplacer encore plus vite et plus efficacement que les autres archosaures.

Ces premiers dinosauiromorphes n'étaient pas bien effrayants, cependant. Ils avaient la taille d'un chat domestique et de longues jambes maigres. Et ils n'étaient pas nombreux non plus: moins de 5% de toutes les traces de Stryczowice appartiennent à *Prorotodactylus* et elles sont noyées au milieu de celles de petits reptiles, d'amphibiens et même d'autres archosaures. Le temps des dinosaures n'était pas venu. Pas encore.

Au cours des 10 à 15 millions d'années suivantes, les dinosauiromorphes ont continué à se diversifier. Les archives fossiles de cette période montrent un nombre croissant d'empreintes du même type, d'abord en Pologne, puis dans le monde entier. Les traces s'agrandissent et l'éventail de leurs formes s'élargit. Certaines pistes deviennent dépourvues d'empreintes de mains, un signe que leurs propriétaires ne marchaient plus que sur leurs pattes arrière. Les squelettes avaient donc commencé à se redresser. Puis, à un moment il y a entre 240 et 230 millions d'années, l'un de ces



▷ dinosaumorphes primitifs a évolué en un dinosaure. Seul le nom a radicalement changé – la transition n’a comporté que quelques subtiles innovations anatomiques : une longue fente sur le haut du bras où s’ancraient de plus gros muscles, des collerettes en forme de tablier sur les vertèbres du cou où s’enracinaient des ligaments plus solides, et une articulation ouverte reliant le fémur et le bassin, qui stabilisait la posture debout. Pourtant, aussi modestes soient ces changements, ils ont marqué le début d’une nouvelle ère.

Les plus anciens fossiles de dinosaures au sens strict, qui datent d’environ 230 millions d’années, proviennent du paysage martien du parc naturel d’Ischigualasto, en Argentine. Là, pendant des décennies, des scientifiques, dont le paléontologue américain Alfred Romer et les chercheurs argentins Osvaldo Reig et José Bonaparte, au milieu du xx^e siècle, ont mis au jour des fossiles. Plus récemment, dans les années 1980 et 1990, Paul Sereno, de l’université de Chicago, et Ricardo Martínez, de l’université nationale de San Juan, en Argentine, ont mené des expéditions à Ischigualasto. Parmi les fossiles exhumés au fil des ans figurent ceux de *Herrerasaurus*, *Eoraptor* et d’autres animaux représentant les trois branches principales de la famille des dinosaures : les théropodes carnivores, les sauropodomorphes, herbivores à long cou, et les ornithischiens, herbivores à bec.

CANTONNÉS AUX LATITUDES MOYENNES DE LA PANGÉE

Au milieu du Trias, il y a environ 230 à 220 millions d’années, ces trois principaux sous-groupes de dinosaures étaient constitués et vivaient dans un monde que nous reconnaitrions à peine. À l’époque, un seul supercontinent, la Pangée, s’étendait d’un pôle à l’autre, entouré d’un océan mondial, la Panthalassa. À première vue, la Terre n’était pas très hospitalière. Le climat était beaucoup plus chaud qu’aujourd’hui et, la Pangée étant centrée sur l’équateur, la moitié des terres brûlaient sous le soleil en été tandis que l’autre éprouvait la morsure du froid hivernal. Ces écarts thermiques prononcés alimentaient de violentes moussons gigantesques qui séparaient la Pangée en provinces caractérisées par divers degrés de précipitations et de vent. La région équatoriale, incroyablement chaude et humide, était bordée des deux côtés par des déserts subtropicaux. Les régions de latitudes moyennes étaient légèrement plus fraîches et beaucoup plus humides.

Herrerasaurus, *Eoraptor* et les autres dinosaures d’Ischigualasto bénéficiaient du climat relativement clément des moyennes latitudes, de même que leurs cousins du Brésil et de l’Inde, dont les fossiles ont été mis au jour récemment. Mais *quid* du reste du

QUERELLE DE FAMILLE

Le débat peut-être le plus houleux de la recherche contemporaine sur les dinosaures porte sur

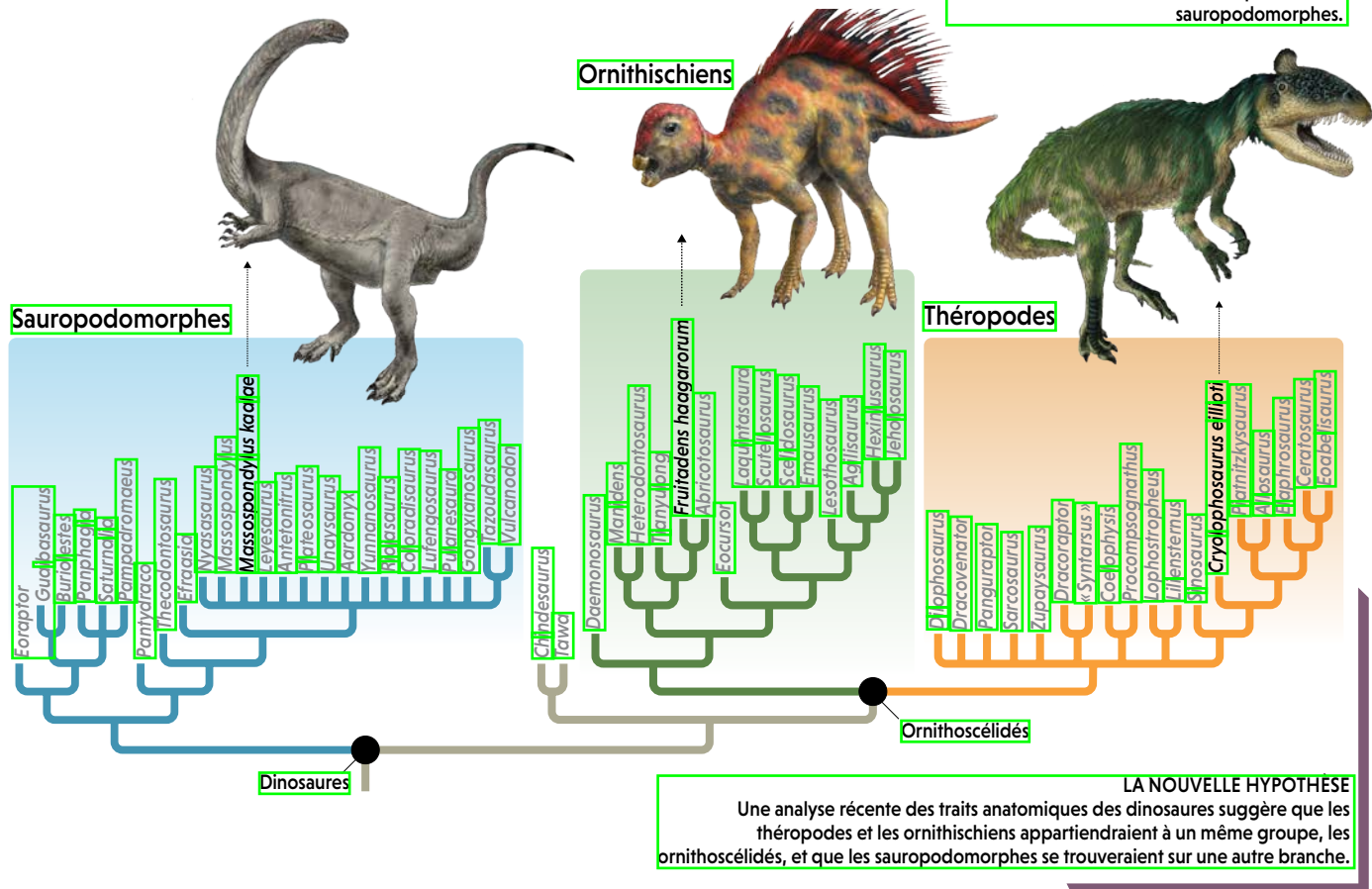
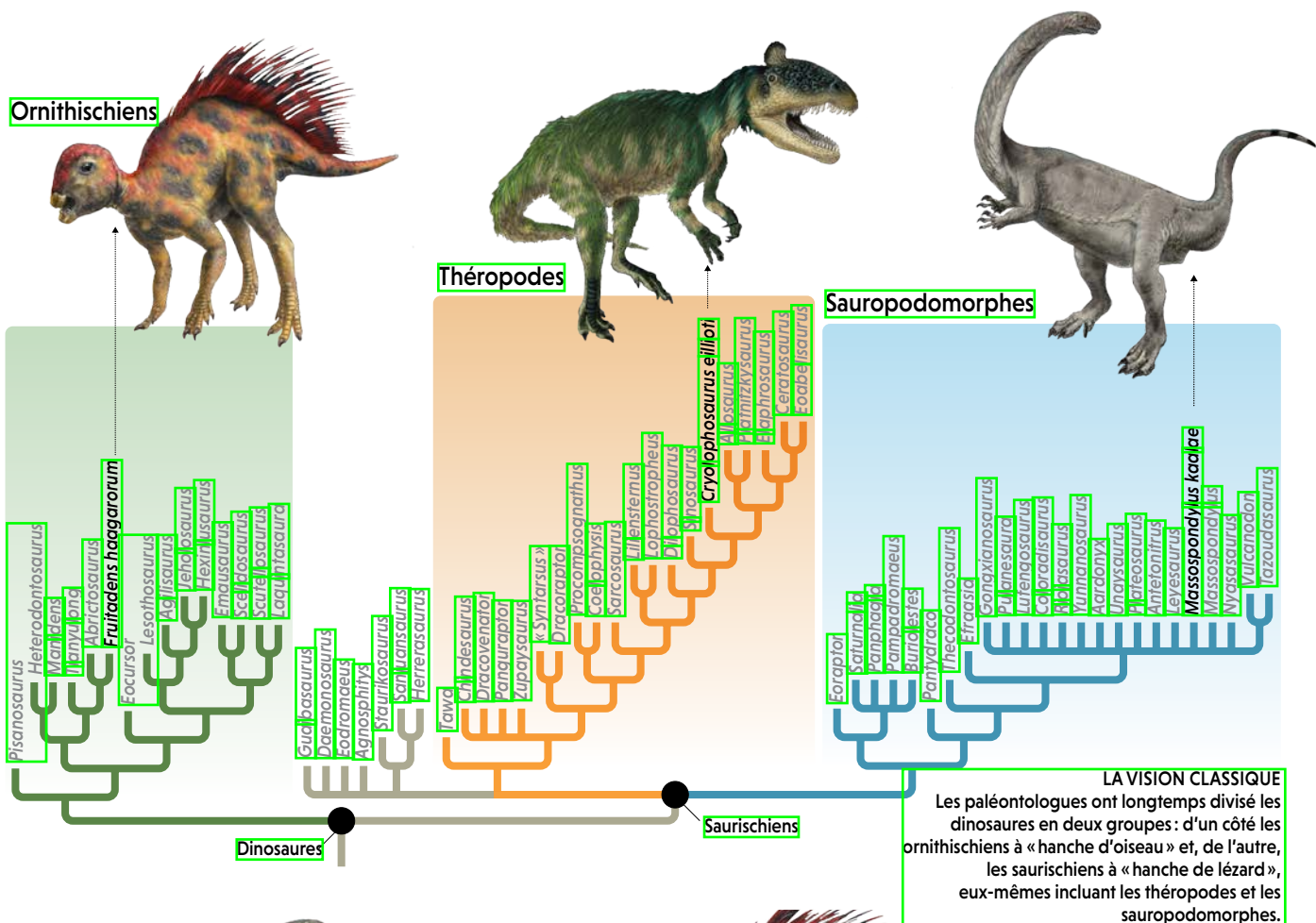
la façon dont les théropodes, les sauropodomorphes et les ornithischiens sont regroupés au sein d’une même famille. En 1887, le paléontologue britannique Harry Govier Seeley étudia la masse de nouveaux fossiles en provenance d’Europe et de l’Ouest américain et soutint que les dinosaures pouvaient être rangés en deux catégories distinctes, fondées sur la structure des os de la hanche. Les théropodes et les sauropodomorphes ont un os pubien pointant vers l’avant, comme les lézards modernes, aussi les rassembla-t-il dans un même groupe qu’il nomma les saurischiens – les « espèces à hanche de lézard ». Il considéra en revanche les ornithischiens, avec leur pubis projeté en arrière comme chez les oiseaux modernes, comme une branche distincte de dinosaures à « hanche d’oiseau ». Cette dichotomie fondamentale perdure aujourd’hui. Comme tous mes camarades chasseurs de fossiles, j’ai appris cette façon de classer les dinosaures à l’université.

Pourtant, elle pourrait bel et bien se révéler fautive. Dans une étude publiée en 2017 qui a fait beaucoup de bruit, Matthew Baron, doctorant de l’université de Cambridge, et ses collègues ont présenté une nouvelle généalogie des dinosaures fondée sur l’analyse d’un vaste ensemble de données portant sur des dinosaures primitifs et leurs caractéristiques anatomiques. Leur arbre généalogique rassemble les théropodes et les ornithischiens dans un nouveau groupe, les ornithoscélidés, tandis que les sauropodomorphes se retrouvent perchés sur une branche distincte. Au lieu d’opposer les saurischiens et les ornithischiens, la nouvelle dichotomie met en scène les ornithoscélidés versus les sauropodomorphes.

Ou peut-être pas. Peu de temps après la publication de cette étude, Max Langer, un paléontologue brésilien, m’a approché. Au cours de la dernière décennie, Max Langer a décrit une série de nouveaux dinosaumorphes et dinosaures du Trias, dont *Ixalerpeton* (un précurseur des dinosaures qui devait ressembler au *Protodactylus* dont les empreintes ont été retrouvées en Pologne) et *Saturnalia* (un protosauropodomorphe de la taille d’un chien). Il était sceptique à l’égard de la nouvelle généalogie et recrutait une équipe d’experts sur les premiers dinosaures pour examiner les données de Matthew Baron. Parce que j’avais étudié les traces polonaises et d’autres fossiles clés du Trias, Max Langer m’a demandé de rejoindre le groupe. Pendant un mois, nous avons procédé à un examen méticuleux de l’ensemble des données et noté nos différents désaccords sur la façon dont l’autre équipe avait elle-même procédé. Puis nous avons repris l’analyse des traits avec nos propres corrections. L’arbre généalogique qui en a résulté est revenu au modèle saurischiens versus ornithischiens, bien que des tests statistiques aient montré que cet arrangement n’avait pas de valeur extrêmement significative par rapport à l’arbre de Matthew Baron. Nous avons publié nos résultats à l’automne 2017.

Ce que cette ambivalence dans les résultats révèle, c’est que les paléontologues n’ont pas une bonne compréhension de la forme globale de l’arbre généalogique des dinosaures. Il semble que la ruée vers les nouvelles découvertes en Argentine, au Brésil, en Pologne et ailleurs au cours des quinze dernières années a brouillé la donne. Nous comprenons maintenant que les premiers membres des trois principales lignées de dinosaures étaient remarquablement similaires en taille et en anatomie, ce qui transforme en casse-tête la recherche de leurs liens de parenté. Ce problème est mûr pour que la prochaine génération de paléontologues le résolve, probablement de la façon dont ces désaccords sont généralement réglés : avec de nouveaux fossiles.

S. B.
M. C. Langer et al., Untangling the dinosaur family tree, *Nature*, vol. 551, publié en ligne le 2 novembre 2017.



> supercontinent? Les premiers dinosaures, que l'on imagine facilement comme des animaux coriaces et résistants, ont-ils colonisé ces régions aux conditions difficiles? En 2009, quelques mois après notre première escapade en Pologne, Richard Butler et moi avons fait équipe avec Octávio Mateus, du musée de Lourinhã, au Portugal, pour tester cette hypothèse en explorant un vestige de la ceinture aride subtropicale du nord de la Pangée, dans ce qui est aujourd'hui le sud du Portugal. Nous espérions mettre la main sur des dinosaures, mais, à la place, nous avons découvert un charnier de centaines d'amphibiens de la taille d'une petite voiture, que nous avons décrits comme une nouvelle espèce, *Metoposaurus algarvensis*. Ces animaux qui peuplaient les lacs et rivières du Trias avaient été victimes de la météo capricieuse de l'époque, qui avait probablement asséché leurs lacs. Nous sommes revenus plus tard creuser le lit d'os et y avons aussi trouvé des fossiles de divers poissons, de reptiles de la taille d'un caniche et d'archosaures de la lignée menant aux crocodiles. Mais à ce jour, nous n'avons trouvé aucun os de dinosaure, pas même un fragment.

Et nous n'en découvrirons probablement jamais. L'Espagne, le Maroc et la côte est de l'Amérique du Nord possèdent d'éblouissants sites fossilifères vieux de 230 à 220 millions d'années. Le bilan des fouilles y est le même qu'au Portugal, avec une abondance d'amphibiens et de reptiles, mais aucun dinosaure. Tous ces sites se situaient dans le secteur aride de la Pangée. Qu'en conclure? Qu'au début de leur évolution, les dinosaures se sont diversifiés lentement dans les régions tempérées humides, mais qu'ils étaient apparemment incapables de coloniser les déserts. C'est une histoire inattendue: les dinosaures n'ont pas été ces créatures extraordinaires qui se seraient comportées en conquérants et auraient occupé toute la Pangée dès leur apparition. La réalité est moins épique: les premiers dinosaures ne supportaient pas la chaleur et vivaient dans une zone géographiquement restreinte – ils étaient de simples habitants d'un monde fragile qui tentait de se remettre de la grande extinction de la fin du Permien.

UN MYSTÉRIEUX COUP DE POUCE

Mais alors que les dinosaures semblaient devoir rester à jamais prisonniers de cette ornière évolutive, ils ont bénéficié d'un coup de pouce du destin. Tout d'abord, dans la zone humide, les grands herbivores dominants de l'époque – des reptiles nommés rhynchosaures et des cousins des mammifères nommés dicynodontes – ont décliné, disparaissant de régions entières pour des raisons encore inconnues. Leur chute, il y a entre 225 et 215 millions

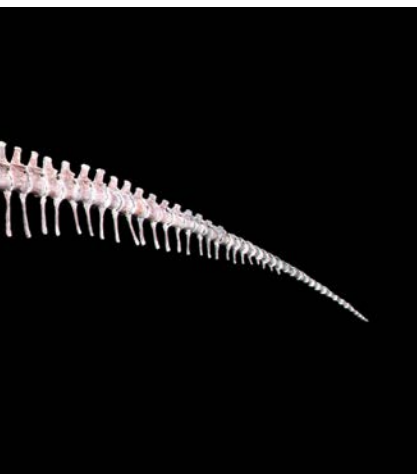


UNE COMPÉTITION RUDE

Durant une grande partie du Trias, les dinosaures formaient un groupe marginal, éclipsé par des espèces apparentées à des crocodiles, tel *Saurosuchus* (1), et par des amphibiens géants, tel *Metoposaurus* (2)

d'années, a laissé vacantes de nouvelles niches écologiques qu'ont occupées les sauropodomorphes primitifs herbivores tels que *Saturnalia*, une espèce de la taille d'un chien, au cou légèrement allongé. Ces ancêtres des sauropodes sont devenus les principaux herbivores des zones humides des hémisphères Nord et Sud. Ensuite, il y a environ 215 millions d'années, les dinosaures ont finalement pénétré dans les déserts de l'hémisphère Nord, probablement en raison de modifications des moussons et de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique qui ont atténué les différences entre régions humides et arides et facilité la migration des dinosaures des unes aux autres.

La route restait longue, toutefois, avant que les dinosaures ne règnent sur la planète. Les meilleurs enregistrements fossiles des



premiers dinosaures du désert proviennent d'une région redevenue aride aujourd'hui: les Badlands colorées du sud-ouest des États-Unis. Depuis plus d'une décennie, une équipe de jeunes chercheurs fouille méthodiquement le site nommé Hayden Quarry (la «carrière de Hayden»), situé au Nouveau-Mexique, dans une région qui a inspiré la peintre américaine Georgia O'Keeffe. L'équipe (composée de Randall Irmis, de l'université de l'Utah, Sterling Nesbitt, de l'université VirginiaTech, Nathan Smith, du Muséum d'histoire naturelle du comté de Los Angeles, Alan Turner, de l'université Stony-Brook, dans l'État de New York, et Jessica Whiteside, de l'université de Southampton, en Angleterre) y a découvert une mine de squelettes: des amphibiens monstrueux étroitement apparentés au *Metoposaurus* portugais, des ancêtres primitifs de crocodiles et une foule bigarrée de reptiles nageurs et arboricoles. Des restes de dinosaures sont aussi présents à Hayden Quarry, même s'ils sont peu nombreux: on y trouve seulement une poignée d'espèces de théropodes prédateurs, chacune représentée par quelques fossiles. Aucun herbivore en revanche: ni d'espèce ancestrale à long cou si commune dans les zones humides ni d'ancêtre ornithischien du *Triceratops*.

Les chercheurs invoquent cette fois encore le climat pour expliquer la rareté des dinosaures: ces déserts étaient des environnements instables où températures et précipitations

Finalement, peu importe le moment auquel on s'intéresse dans le Trias, des premiers pas des dinosaures, il y a environ 230 millions d'années, jusqu'à la fin de la période, il y a 201 millions d'années, l'histoire est la même. Les dinosaures vivaient dans des environnements très spécifiques – forêts humides ou déserts arides – et, où qu'ils soient, ils étaient entourés de toutes sortes d'animaux plus gros, plus communs, mais aussi plus diversifiés. À Ischigualasto, par exemple, les premiers dinosaures ne représentaient qu'environ 10 à 20% de l'écosystème total. La situation était similaire au Brésil et, des millions d'années plus tard, à Hayden Quarry. Dans tous les cas, les dinosaures étaient largement inférieurs en nombre aux ancêtres des mammifères, aux amphibiens géants et aux reptiles excentriques.

UN COMPÉTITEUR FÉROCE

Mais avant tout, les dinosaures du Trias ont été surpassés par les pseudosuchiens, leurs cousins proches situés du côté crocodile de la famille des archosaures. À Ischigualasto, un archosaurien de la lignée des crocodiles nommé *Saurosuchus* régnait sur la chaîne alimentaire, avec ses dents acérées et ses mâchoires puissantes. Hayden Quarry abritait de nombreuses espèces pseudosuchiennes: des versions semi-aquatiques avec de longs museaux, des herbivores au corps couvert de plaques et même des animaux dépourvus de dents qui couraient sur leurs pattes de derrière et ressemblaient étrangement à certains théropodes qu'ils côtoyaient.

Lorsque j'étais étudiant, à la fin des années 2000, beaucoup de ces fossiles venaient d'être mis au jour et cette répartition m'a interpellé. Il faut dire que j'avais commencé à lire des ouvrages classiques de paléontologie, tels ceux de Robert Bakker et Alan Charig. Ces livres soutenaient avec emphase que les dinosaures, ces créatures rapides, endurantes et intelligentes, étaient si bien adaptés à leur environnement qu'ils avaient rapidement pris le dessus sur leurs cousins crocodiles et leurs autres compétiteurs du Trias. Cette idée ne concordait manifestement pas avec les archives fossiles. Existait-il un moyen de la tester?

Après m'être plongé dans des ouvrages de statistiques, j'ai pris conscience que, deux décennies plus tôt, les paléontologues qui étudiaient les invertébrés avaient mis au point une méthode de mesure de la diversité anatomique à l'intérieur d'un groupe d'espèces. Or, jusque-là, les spécialistes des dinosaures avaient ignoré cette méthode. Si je parvenais à suivre la disparité morphologique des dinosaures et des pseudosuchiens au cours du Trias, je verrais s'ils étaient devenus de plus en plus variés avec le temps et à quel rythme – ce qui indiquerait s'ils avaient conquis le

Les dinosaures étaient entourés de toutes sortes d'animaux plus gros et plus diversifiés

fluctuaient, oscillant entre des périodes d'intenses feux de brousse et d'autres humides. Les plantes avaient sans doute des difficultés à s'établir de façon stable, de sorte que les dinosaures herbivores ne disposaient pas de ressources alimentaires régulières. Ainsi, quelque 20 millions d'années après leur apparition, même après être devenus les principaux herbivores des écosystèmes humides et même après avoir commencé à coloniser les déserts tropicaux, les dinosaures n'étaient toujours pas les maîtres incontestés des continents.

> monde graduellement ou brusquement – et si un groupe avait devancé les autres.

Avec mes superviseurs de l'époque, à l'université de Bristol, en Angleterre – Michael Benton, Marcello Ruta et Graeme Lloyd – j'ai compilé un vaste ensemble de données sur les dinosaures et les pseudosuchiens du Trias, portant sur plus de quatre cents caractéristiques de leur anatomie. Lorsque nous avons analysé ces données d'un point de vue statistique, nous avons obtenu un résultat étonnant, que nous avons publié en 2008. Tout au long du Trias, l'anatomie des pseudosuchiens était plus variée que celle des dinosaures, ce qui indique qu'ils expérimentaient davantage de régimes alimentaires et de comportements, bref de modes de vie. Les deux groupes se sont diversifiés au fil du Trias, mais les pseudosuchiens devançaient toujours les dinosaures. Contrairement à l'image classique les dépeignant comme de supersoldats massacrant leurs rivaux, les dinosaures avaient joué les seconds rôles au profit des pseudosuchiens pendant la plus grande partie de leur longue coexistence.

UN CHAOS SALUTAIRE

Notre analyse statistique nous a conduits à une conclusion iconoclaste : les premiers dinosaures n'avaient rien de spécial, du moins par rapport à la variété des autres animaux qui évoluaient au cours du Trias. Si vous aviez foulé à l'époque le sol de la Pangée, vous auriez probablement considéré les dinosaures comme un groupe assez marginal. Et si vous avez l'esprit joueur, à la question : « Quelles créatures deviendront énormes et conquerront la planète ? », vous auriez probablement misé sur d'autres animaux, et sans aucun doute sur les pseudosuchiens. Mais, bien sûr, nous savons que ce sont les dinosaures qui ont pris l'ascendant et qui survivent aujourd'hui encore à travers plus de 10 000 espèces d'oiseaux. En revanche, seulement une vingtaine d'espèces de crocodiliens modernes ont survécu jusqu'à nos jours.

Comment les dinosaures ont-ils fini par voler la couronne à leurs cousins de la lignée crocodile ? Le plus grand facteur semble avoir été un autre coup de chance indépendant de l'évolution des dinosaures elle-même. Vers la fin du Trias, des forces tectoniques ont étiré la Pangée d'est en ouest et provoqué la fissuration du supercontinent. La longue fracture – que, plus tard, l'océan Atlantique a comblée – a permis à du magma de remonter vers la surface. Pendant plus de 500 000 ans, des épanchements de lave ont envahi une grande partie de la Pangée centrale, d'une façon étrangement semblable aux énormes éruptions volcaniques qui avaient marqué la fin du Permien 50 millions d'années auparavant. Comme ces éruptions antérieures, celles du Trias ont provoqué

une extinction de masse. Les lignées des archosaures ont presque toutes été décimées et seules quelques espèces – les ancêtres des crocodiles et des alligators d'aujourd'hui – ont traversé cet âge sombre.

De leur côté, les dinosaures semblent avoir à peine remarqué ce déluge de feu et de soufre. Tous les principaux sous-groupes – théropodes, sauropodomorphes et ornithischiens – étaient présents dans la période géologique suivante, le Jurassique. Durant la phase de volcanisme, tan-

Les dinosaures avaient joué les seconds rôles au profit des ancêtres des crocodiles

dis que le monde vivait un enfer, les dinosaures prospéraient, profitant en quelque sorte du chaos qui les entourait. J'aimerais pouvoir expliquer comment cela a été possible – les dinosaures possédaient-ils un avantage unique face aux pseudosuchiens ou se sont-ils simplement retrouvés indemnes après le crash de l'avion, sauvés par la chance quand tant d'autres espèces avaient péri ? La prochaine génération de paléontologues aura à résoudre cette énigme.

Quelle que soit la raison qui a permis aux dinosaures de survivre au désastre, les conséquences de cet épisode mystérieux de leur histoire sont, elles, parfaitement établies. Une fois libérés de la pression de leurs rivaux pseudosuchiens, les dinosaures ont prospéré au Jurassique. Ils se sont diversifiés et sont devenus plus abondants et plus massifs que jamais. Des espèces radicalement nouvelles sont apparues qui ont migré et joué un rôle prédominant dans les écosystèmes du monde entier. Parmi ces nouveaux venus figuraient les premiers dinosaures avec des plaques sur le dos et une armure couvrant le corps ; les premiers sauropodes colossaux qui faisaient trembler la terre quand ils marchaient ; les ancêtres du *T. rex* et un assortiment d'autres théropodes qui avaient déjà entamé leur évolution vers une taille plus petite, des bras raccourcis et un corps couvert de plumes – les aïeux des oiseaux. Les dinosaures dominaient enfin la Terre. Il avait fallu plus de 30 millions d'années, mais leur règne commençait. ■

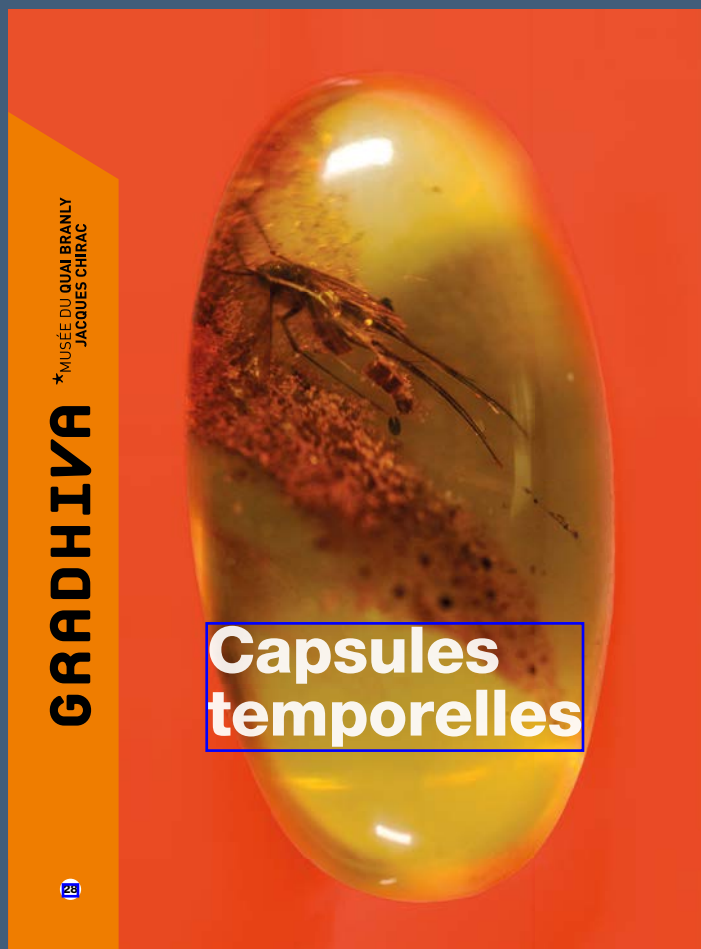
BIBLIOGRAPHIE

S. L. Brusatte, *The Rise and Fall of the Dinosaurs*, William Morrow, 2018.

S. L. Brusatte, G. Niedźwiedzki et R. J. Butler, *Footprints pull origin and diversification of dinosaur stem lineage deep into early Triassic*, *Proc. R. Soc. B*, vol. 278, pp. 1107-1113, 2011.

S. L. Brusatte et al., *The origin and early radiation of dinosaurs*, *Earth-Science Reviews*, vol. 101, pp. 68-100, 2010.

LA REVUE GRADHIVA★



CAPSULES TEMPORELLES

Une capsule temporelle est une œuvre de sauvegarde collective de biens et d'informations, comme témoignage destiné aux générations futures. Elle peut être intentionnellement créée et enterrée, souvent lors d'une cérémonie programmant la date de son ouverture, ou résulter d'une catastrophe, comme le site archéologique de Pompéi. Si les capsules temporelles remontent aux premières formes de civilisation écrite, comme en Mésopotamie, elles sont aussi au cœur des pratiques des artistes contemporains qui souhaitent constituer une archive de leur vie quotidienne, comme le faisait Andy Warhol.

La description des capsules temporelles soulève des questions symboliques sur ce qu'une société ou un individu souhaite transmettre aux générations futures. Mais elle pose aussi des problèmes d'infrastructure matérielle. Comment stocker les objets dans une capsule temporelle de façon à constituer une totalité signifiante? Comment conserver ces données de façon à ce qu'elles se préservent dans des conditions climatiques encore inimaginables? Comment communiquer avec les générations futures pour leur indiquer la signification de ces témoignages?

Les capsules temporelles croisent tout un ensemble de questions qui se posent dans des lieux très différents où des matériaux et des informations sont stockés et conservés pour être transmis aux générations futures. Ce numéro abordera ainsi ces questions dans les pratiques d'art contemporain, dans les fouilles archéologiques, dans les musées ou dans les centrales nucléaires. Sur des terrains et des objets précis, on interrogera comment un patrimoine se constitue non plus seulement par la conservation du passé mais par la projection dans un avenir.

*« Comment communiquer
avec les générations
futures pour leur
indiquer la signification
de ces témoignages? »*

Au XIX^e siècle, certains hôpitaux, comme l'hôpital Saint-Louis, à Paris, nourrissaient non seulement les malades, les infirmiers et le personnel de service, mais aussi les pauvres du quartier. Avec l'invention du bouillon de gélatine osseuse, on espérait améliorer leur alimentation, insuffisante en période de pénurie.



L'ESSENTIEL

> A partir de 1814, le chimiste et industriel Jean-Pierre-Joseph d'Arcet, fort d'un rapport positif de la Faculté de médecine, produisit à grande échelle de la gélatine d'os à visée alimentaire.

> Malgré les réticences et protestations des consommateurs, l'utilisation du bouillon de gélatine osseuse

se répandit dans les hôpitaux, les hospices et l'armée.

> En 1831, un jeune médecin, Alfred Donné, sollicita auprès de l'Académie des sciences une étude des qualités nutritives de cette gélatine.

> La commission constituée s'embourba dans les conflits d'intérêts.

L'AUTEURE



FANI PAPADOPOULOU
docteure en
épistémologie
et histoire des sciences
de l'université
Paris-Diderot

La controverse de la gélatine

Au début du XIX^e siècle, un industriel mit au point un dispositif pour extraire la gélatine des os à grande échelle et proposa de l'utiliser pour nourrir malades, personnel hospitalier, soldats, marins et pauvres. Mais la substance était-elle réellement nutritive ?

Le 13 octobre 1828, on installa à l'hôpital de la Charité, à Paris, une machine d'extraction de la gélatine des os au moyen de la vapeur d'eau, invention du chimiste et industriel Jean-Pierre-Joseph d'Arcet. L'événement était d'importance, en témoignait la présence de l'administration des hospices civils de Paris et du ministre de l'Intérieur. À l'aide de cette machine, on espérait fournir aux malades et convalescents de l'hôpital mille rations supplémentaires par jour. Les os traités dans cet appareil proviendraient de la viande déjà consommée dans l'établissement, et la gélatine retirée servirait à confectionner le bouillon gélatineux. Grâce à l'innovation de d'Arcet, on remplacerait les trois quarts de la viande du bouillon ordinaire par la dissolution gélatineuse sans que la qualité nutritive du bouillon – disait-on – fût affaiblie.

La machine inaugurée promettait donc une augmentation des sources de nourriture à partir d'une matière qui ne coûtait presque rien et qui, jusqu'à présent, était négligée, encombrant la ville et ses environs. On espérait ainsi améliorer le régime alimentaire des malades des hôpitaux, mais aussi des pauvres et des soldats, et en

particulier combler le déficit d'aliments d'origine animale. L'affaire prenait d'autant plus d'ampleur que des découvertes scientifiques récentes montraient la nécessité pour l'homme d'une alimentation azotée. On ne connaissait certes pas les protéines à l'époque, mais on était sur leur piste. Depuis la fin du XVIII^e siècle, on savait en effet que certaines substances organiques – la fibrine (connue comme constituant de base de la chair musculaire et du sang), l'albumine, la gélatine – sont composées de quatre éléments chimiques, l'oxygène, le carbone, l'hydrogène et l'azote, tandis que les autres sont privées d'azote.

Après la Charité, on équipa nombre d'autres établissements, dont les hôpitaux de Lille, Toulouse, Metz, Reims, Rouen, le Dépôt de mendicité de Lyon et l'hôtel des Monnaies de Paris. Cependant, un an plus tard, à la suite de plaintes des malades sur la mauvaise qualité du bouillon gélatineux, d'Arcet dut démonter l'appareil de la Charité. Incriminant la négligence et la malveillance des surveillants, il transféra la machine à l'hôpital Saint-Louis et s'en tint à cette explication lorsque d'autres récriminations suivirent ailleurs. Toutefois, lorsqu'en 1831, dans un mémoire adressé à l'Académie des sciences, un jeune médecin, Alfred Donné, mit formellement

En doute le pouvoir nourrissant de la gélatine osseuse et, par conséquent, son emploi alimentaire, l'affaire prit une tout autre dimension. Une vive controverse s'ensuivit pendant plus de dix ans, mêlant savants, industriels, consommateurs et pouvoir en place, qui n'est pas sans évoquer certaines affaires actuelles de santé. L'enquête que j'ai menée sur cette affaire il y a quelques années, durant ma thèse sur la nutrition au XIX^e siècle, dans des archives encore peu exploitées, notamment à l'Académie des sciences, a révélé comment, déjà à l'époque, des intérêts variés influençaient sur les décisions politiques... pour le meilleur et pour le pire.

DANS LA MARMITE DE PAPIN

L'emploi alimentaire de la gélatine extraite des os n'était pas une idée nouvelle. En 1681, l'inventeur Denis Papin, faisant la démonstration de sa fameuse marmite (l'ancêtre de l'autocuiseur : un « digesteur » muni d'une soupape de sécurité), avait mis en évidence le contenu gélatineux des os. Devant sa ressemblance avec la gelée que l'on extrait en cuisant de la viande dans l'eau bouillante, on avait d'emblée considéré cette gélatine comme nutritive. Au XVIII^e siècle, des chimistes (dont le père de d'Arcet, Jean) avaient ainsi tenté d'améliorer le procédé d'extraction. Et gouvernements et administration révolutionnaires y avaient fait appel pour porter remède aux disettes et aux famines.

Un pas avait été franchi en 1803, quand Antoine-Alexis Cadet de Vaux, un pharmacien, industriel et philanthrope, avait demandé à l'Académie des sciences de se prononcer sur l'usage alimentaire de la gélatine osseuse. Il souhaitait développer son emploi à l'hôpital, dans l'armée et la Marine et aux soupes distribuées aux indigents. Vu la famine dont souffraient les classes pauvres du fait de la Révolution et des guerres, les académiciens, tout en objectant que ses arguments en faveur de cette solution étaient faibles, avaient approuvé sa démarche et l'avaient même invité à l'étendre.

Le procédé d'extraction de Cadet de Vaux consistait à broyer les os, puis à les cuire dans l'eau, à l'instar de Papin. Toutefois, ce procédé ne dissolvait que très peu de gélatine des os. D'Arcet, qui avait reçu de son père l'intérêt pour la gélatine osseuse, avait alors cherché un moyen de développer la production de gélatine alimentaire à grande échelle sous la forme de tablettes de gélatine, tablettes de bouillon, biscuits et bouillons gélatineux. Il avait mis au point un procédé d'extraction au moyen d'acide et s'était lancé en 1813 dans son application à l'échelle industrielle en s'associant à un certain Robert, qui dirigeait la plus grande industrie d'extraction de gélatine d'os pour la production de colle, au Gros-Caillou, à Paris.

D'Arcet avait ensuite reçu sans trop de difficulté l'autorisation d'utiliser cette gélatine

comme aliment. Certes, quand en 1814, il avait proposé son produit à la Société philanthropique de Paris pour la confection de soupes et de bouillons économiques distribués aux indigents et aux convalescents pauvres, la Société avait habilement évité de répondre en dépit d'un rapport favorable : elle avait demandé à la Faculté de médecine de Paris d'examiner si la gélatine osseuse était une substance nourrissante et salubre. Une commission avait alors organisé des observations à l'hospice de la Charité. Pendant trois mois, on avait nourri quarante personnes – malades, convalescents et gens du service – de bouillon fabriqué chez d'Arcet et Robert. Mais, admettant *a priori* que la gélatine extraite des os était analogue à celle de la viande, les médecins s'étaient prononcés en faveur de son pouvoir nourrissant. Les personnes nourries du bouillon gélatineux l'avaient trouvé aussi agréable que le bouillon ordinaire servi dans les hôpitaux. N'était-ce pas une preuve de sa qualité nutritive, puisque les aliments agréables et savoureux se digèrent plus facilement et s'assimilent donc bien ? Quant à sa salubrité, ils n'avaient remarqué aucun incident que l'on aurait pu attribuer à la

LES EXPÉRIENCES D'ALFRED DONNE

Devant le mécontentement des consommateurs de gélatine osseuse, ce jeune médecin se soumit lui-même à un régime composé de gélatine d'os et de pain, ainsi que deux chiens. Consignées dans un carnet (ci-dessous), ses expériences convinquirent l'Académie des sciences de constituer une commission pour statuer sur la qualité nutritive de la gélatine d'os.

Tableau des Expériences faites sur l'emploi
de la Gélatine comme substance alimentaire.

La Gélatine que j'ai employée était une Gelée
très concentrée, sucrée et aromatisée pour moi soit
avec du citron, soit avec un peu d'alcoolique ;
j'ai donné la Gélatine à mes chiens avec un peu
de graisse et salée. Je trouve dans le Tableau
toutes les quantités de Gélatine consommées, et les
quantités équivalentes de Gélatine sèche.

Dix grammes de Gélatine sèche équivalent
suivant les calculs de M^r D'Arcet à un demi
litre du meilleur Bouillon de la viande. un demi
litre forme à peu près deux bols ordinaires.

Expériences faites sur moi
Je pèse 129 livres et demi

LES PROCÉDÉS DE D'ARCET

Le premier procédé mis au point par Jean-Pierre-Joseph d'Arcet pour extraire de la gélatine des os était fondé sur l'utilisation d'acides. Les os, concassés et nettoyés, étaient soumis à de l'acide chlorhydrique affaibli pendant huit à douze jours, ce qui dissolvait les phosphates des chaux des os, mais laissait intacte leur matière organique. Après lavage, cette partie organique était plongée dans un second bain d'acide, puis lavée et soumise à de l'eau bouillante. Le second procédé consistait à ramollir des os concassés en les déposant dans un panier, que l'on descendait dans une enceinte où l'on introduisait de la vapeur à l'aide d'un robinet pendant au moins une demi-heure. Puis, après fermeture de l'enceinte, on ouvrait le robinet inférieur de vidange, d'où sortait d'abord la graisse, puis la gélatine.

LA MACHINE À VAPEUR DE L'HÔPITAL SAINT-LOUIS

Inspiré de la marmite à vapeur de Denis Papin, cet appareil de d'Arcet fut installé dans de nombreux hôpitaux.

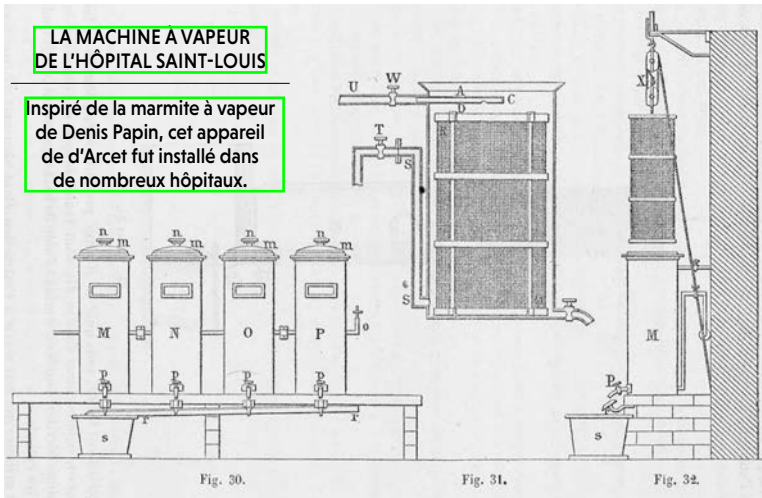


Fig. 30.

Fig. 31.

Fig. 32.

gélatine: les maladies avaient suivi leur marche ordinaire et les convalescences n'avaient pas été plus longues.

Le rapport positif de la Faculté avait eu une grande influence sur l'opinion des médecins et sur les affaires de d'Arcet – et évidemment de toute la branche de cette industrie. Les circonstances sociales aggravantes (guerres napoléoniennes, blocus continental de l'Angleterre) avaient aussi eu leur part. Peut-on attribuer le jugement de la commission à l'influence de d'Arcet? En partie, peut-être. Mais les médecins étaient aussi convaincus de la qualité nutritive de la gélatine. Certes, elle n'avait ni l'odeur ni la saveur du bouillon de viande, mais cela était corrigé, disaient-ils, par l'addition d'un peu de bouillon de viande que d'Arcet proposait. Par ailleurs, comment supprimer une source d'alimentation à partir de simples doutes? Et par quoi la remplacer? Nourrir de viande toutes les populations démunies aurait exigé des dépenses énormes que l'État n'était pas en mesure de financer, disaient les défenseurs de la gélatine.

Après ce rapport, les fabriques d'extraction de gélatine s'étaient multipliées. On vendait du bouillon ou des tablettes de bouillon aux restaurateurs, aux classes pauvres, aux hôpitaux, etc. D'Arcet avait fourni des tablettes et des biscuits gélatineux au ministère de la Marine, pour les navigateurs, et 400 000 au ministère de la Guerre, pour l'armée d'occupation d'Alger. Il

avait aussi conçu un nouveau procédé d'extraction de la gélatine au moyen de la vapeur, inspiré de celui de Papin, mais plus sécurisé et limité en température, ce qui évitait d'altérer la substance. Son procédé avait l'avantage de fonctionner dans des appareils installables dans les ports ou à l'hôpital, qui produisaient alors la gélatine sur place (voir l'encadré ci-contre).

Malgré le mécontentement des consommateurs de la gélatine osseuse, leur voix n'était pas entendue. On la perçoit cependant dans les critiques des défenseurs de son emploi alimentaire à l'encontre des préjugés du peuple. Les procédés d'extraction faisant intervenir des agents chimiques provoquaient l'effroi, sa saveur et son odeur souvent nauséabonds, son aspect trouble, la source douteuse des os, dégoûtaient. Mais à en croire les fabricants, c'était à cause de ces préjugés que le public n'acceptait pas ce produit et le repoussait. Parmentier n'avait-il pas lui aussi dû vaincre les réticences pour introduire la pomme de terre dans l'alimentation des Français?

LA COMMISSION DE LA GÉLATINE

C'est dans ce paysage houleux qu'Alfred Donné, jeune médecin connu pour ses feuilletons, publiés dans le *Journal des débats*, sur les réunions de l'Académie des sciences, s'est fait le porte-parole des consommateurs de la gélatine osseuse. Il s'est mis lui-même – ainsi que deux chiens – au régime de la gélatine et du pain. Pendant les deux semaines de l'expérience, et tout en conservant son dîner, il a été tourmenté de faim et a maigri de deux kilos. L'un de ses chiens est resté affamé quatre jours à côté de la gélatine sans la toucher. En juin 1831, Donné fait connaître les résultats de ses expériences à l'Académie des sciences afin de solliciter une étude approfondie sur ce nouveau produit alimentaire. Il signale que les savants l'ont admis comme un aliment nourrissant sur une idée préconçue due à sa ressemblance avec la gélatine de viande. Des malades sont nourris de cette substance, écrit-il, sans qu'elle n'ait été jamais soumise à l'épreuve de l'expérience directe. Donné met également en doute le préjugé scientifique admettant que toute matière azotée est nutritive. En 1816, en effet, le médecin et physiologiste François Magendie avait démontré que les aliments azotés sont nécessaires à l'entretien de la vie animale et, dans les années 1830, les chimistes, et plus particulièrement Jean-Baptiste Boussingault, en avaient déduit un peu vite que la valeur nutritive d'un aliment dépendait de sa quantité d'azote.

En réponse au mémoire de Donné, l'Académie désigne une commission composée de chimistes, dont Michel-Eugène Chevreul et Jean-Baptiste Dumas, et de médecins, dont Magendie. D'Arcet fait aussi partie de la commission. On y percevait aujourd'hui un conflit d'intérêts, mais dans l'esprit de l'époque, il n'en est rien. La

pratique est assez fréquente et personne ne s'élève contre cette désignation durant le débat. D'Arcet répète même souvent que l'Académie a exigé sa présence dans la commission, l'obligeant ainsi à garder le silence devant le public.

Dès le départ, il semble se former deux opinions sur le procédé d'expertise à suivre. Pour d'Arcet et ses défenseurs, les rapports des administrateurs d'hôpitaux qui se servent de l'appareil d'extraction de la gélatine constituent des justificatifs de son emploi alimentaire. On y enregistre le nombre de bouillons fournis aux malades et leur satisfaction, une baisse des dépenses pour les médicaments et même une diminution du temps des convalescences. D'Arcet, en tant qu'intéressé, les réunit pour les envoyer à ses confrères de la commission.

Une autre partie de la commission décide de faire appel aux connaissances disponibles en chimie et en physiologie. Outre l'inspection de sa confection et de sa distribution, Chevreul se charge de l'analyse chimique du bouillon gélatineux servi à l'hôpital du Val-de-Grâce pour la comparer à celle du bouillon de viande, fabriqué à grande échelle par la Compagnie hollandaise, concurrente de d'Arcet. Les résultats montrent l'avantage nutritif du bouillon de viande en termes de proportion de matière organique. Dans leurs conclusions, les commissaires expriment leur souhait que l'usage du bouillon de viande soit propagé. Il est probable qu'ils aient voulu empêcher la propagation du bouillon gélatineux et reconnaître, de manière indirecte, l'insuffisance de son pouvoir nutritif. Bien plus tard, Chevreul avouera que son intention était de soutenir le bouillon de viande, que la gélatine risquait de supplanter. Quelle qu'ait été son intention, Chevreul et d'Arcet représentent deux pôles opposés de la commission.

LES EXPÉRIENCES DE MAGENDIE

Le débat s'intensifie, surtout en dehors de la commission, et se forment rapidement deux camps, les gélatinistes et les antigélatinistes. Les médecins William Edwards et Jean-Baptiste de Balzac, extérieurs à la commission et gélatinistes, conduisent des expériences sur des chiens pour démentir les résultats de Donné. Ils en concluent que le bouillon de gélatine, bien qu'inférieur du point de vue nutritif à celui de viande, devient nutritif quand on lui ajoute une petite portion de bouillon de viande qui lui communique sa saveur et son odeur. À ces travaux s'opposent les résultats du chimiste et fabricant de colle forte – par conséquent concurrent de d'Arcet – Jean-Nicolas Gannal. Ses expériences sur lui-même, sur certains membres de sa famille et sur des chiens l'ont conduit aux mêmes résultats que Donné : la gélatine n'est pas nutritive.

Les feuillets de Donné de 1833 suggèrent que presque tous les médecins sont contre le bouillon de gélatine et que les affaires de

DES CHIENS NOURRIS À LA FIBRINE

Dans son enquête sur le pouvoir nutritif de la gélatine d'os, François Magendie (ci-contre) le compara à celui d'autres substances de nos aliments, dont la fibrine, connue à l'époque comme un principe immédiat azoté, constituant de base de la chair musculaire et



partie coagulable du sang. Il observa que des chiens nourris de grandes quantités de fibrine présentaient, après un certain temps, les signes d'une nutrition insuffisante. Lors de l'autopsie d'un animal mort

d'inanition, il trouva dans son corps à peine un gramme de fibrine, bien que la veille

il en ait mangé un kilogramme. « Chose remarquable ! écrit-il, sur cet animal le sang avait presque entièrement disparu. » Magendie et ses contemporains pensaient que la fibrine intervenait dans la composition du sang, d'où son étonnement. Il savait que l'état d'inanition

entraîne l'atrophie des organes, mais il ignorait que les cellules du sang sont produites dans certains organes dits hématopoïétiques, dont l'atrophie a sans doute perturbé la production.

d'Arcet vont mal, puisqu'il est obligé de démontrer plusieurs de ses appareils. Pour Donné, le public a jugé la question et la décision de l'Académie, si elle est prise un jour, n'aura pas grande importance. En tout cas, il prévoit que l'attente de cette décision sera longue en raison des difficultés du sujet. La discussion perd sa vivacité, mais en 1834 une dispute entre les deux camps devant l'assemblée académique réanime le débat. Chevreul démissionne et Magendie reprend l'expertise.

Il réalise des expériences sur la qualité nutritive de la gélatine d'un point de vue physiologique. La conclusion principale de son rapport, présenté en 1841 à l'Académie, affirme : « On ne peut, par aucun procédé connu, extraire des os un aliment qui, seul ou mêlé à d'autres substances, puisse tenir lieu de la viande elle-même. » Magendie a donc répondu non pas à la question soumise à la commission (peut-on utiliser la gélatine comme aliment ?), mais à l'idée préconçue à l'origine de la branche industrielle, selon laquelle la gélatine osseuse est identique à celle de viande. La gélatine administrée seule se montre privée de toute qualité nutritive. En peu de jours, les chiens ne veulent plus y toucher, même s'ils meurent de faim. Assaisonnée avec du bouillon de viande, elle est nutritive, mais insuffisante. Ces résultats expliquent la divergence des conclusions précédentes.

Magendie étudie aussi le pouvoir nutritif d'autres substances faisant partie des aliments, seules ou associées, organiques ou pures, comme l'albumine, la fibrine, l'amidon et le beurre (voir l'encadré ci-dessus). Il en conclut l'importance de l'alimentation mixte. Cependant, la commission ne se prononce pas sur l'emploi de la gélatine

associée à d'autres aliments, car il faut encore, selon Magendie, exécuter des expériences directes sur l'homme. Magendie promet un second rapport pour combler cette lacune – qu'il ne réalisera pourtant jamais. Souhaite-t-il éviter ainsi la condamnation définitive de la gélatine pour ne pas blesser son confrère d'Arcet, dont les appareils sont de toute façon déjà peu à peu mis hors service?

Le fait est que défenseurs et opposants de l'emploi alimentaire de la gélatine sont déçus de son rapport. Tous attendaient le jugement définitif de l'Académie, et on leur promet à présent un autre rapport, après une nouvelle série d'expériences. En 1842, le ministre de l'Intérieur sollicite l'appréciation de l'Institut des Pays-Bas. En Hollande, on emploie la gélatine depuis le début du siècle, mais, comme en France, le pays est partagé entre défenseurs et opposants, dont les membres de l'Institut qui rédigent le rapport. Reçu en 1843, celui-ci déclare la gélatine dépourvue de toute qualité nutritive, même associée à d'autres aliments. Sa lecture à l'Académie, en 1844, agite l'assemblée: des protestations se lèvent contre le ministre pour avoir sollicité le jugement d'une institution étrangère, et contre la commission, qui n'a pas terminé son second rapport. Magendie démissionne. D'Arcet, souffrant, écrit une lettre pour s'opposer à ce dernier verdict et rassurer les consommateurs. Il meurt un peu plus tard.

REBONDISSEMENT

Les événements de 1844 marquent la fin de la discussion sur la gélatine extraite des os. Cependant, certains établissements continuent à préparer du bouillon gélatineux. C'est ainsi qu'en 1849, le ministre de l'Instruction publique demande à l'Académie de médecine de se prononcer sur la mise en fonction d'un appareil installé dans les hospices de Toulouse. Les médecins désapprouvent le projet.

Malgré cette résolution, la gélatine à usage alimentaire redevient d'actualité lors du siège de Paris, en 1870. Un mois après la capitulation de Paris face aux Prussiens, Jean-Baptiste Dumas, d'abord, puis son confrère Edmond Frémy proposent à l'Académie des sciences d'utiliser de l'osséine dans l'alimentation des Parisiens. L'osséine est la matière organique insoluble des os extraite au moyen de l'acide. Si l'on continue l'opération et soumet l'osséine à l'action de l'eau bouillante, on obtient la gélatine. On faisait entrer l'osséine dans la nourriture après pulvérisation. Pour Frémy, non seulement l'osséine mais aussi la gélatine sont nutritives quand elles sont associées à d'autres aliments.

En présence de Dumas et Chevreul, Frémy entame une discussion avec l'objectif de réhabiliter tant la gélatine que la mémoire de d'Arcet, d'autant que sa veuve assiste à cette

séance. Chevreul relate certains épisodes du débat et défend les conclusions de Magendie. Frémy, de son côté, célèbre en d'Arcet un inventeur bienfaiteur de l'humanité. Au début des années 1870, trois fabriques sont ainsi établies à Paris pour produire de l'osséine... Après la guerre franco-prussienne, cependant, la disette s'estompe peu à peu et, avec elle, disparaissent les discussions autour de l'emploi de la gélatine osseuse comme aliment.

Les péripéties de cette controverse et sa durée révèlent toute la complexité de la situation. D'une part, la commission s'est trouvée coincée entre une opinion publique hostile à la gélatine (en particulier les médecins) et un problème réel de combler la carence alimentaire. D'autre part, certains académiciens avaient sans doute aussi la volonté de soutenir leur confrère industriel et, de ce fait, une branche de l'industrie qui risquait de disparaître, laissant au chômage des milliers d'employés. Au cours d'une discussion à l'Académie des sciences, en 1838, son secrétaire perpétuel, François Arago, prenant parti pour d'Arcet, affirma ainsi en toute franchise «qu'il n'hésitera jamais, dans les limites du droit, de la justice et de la vérité, à rendre à ses confrères tous les services qui pourront dépendre de lui.» Il est clair que les notions actuelles d'éthique scientifique ne sont pas applicables à celles des années 1830. Enfin, la science de l'époque elle-même brouillait les pistes: les chimistes – acteurs principaux de l'industrie et de la vie académique – étaient convaincus que la gélatine ne pouvait qu'être nutritive en raison de son contenu en azote, et l'on ignorait encore le mécanisme de la nutrition. La notion de métabolisme restait à venir.

En fin de compte, le travail de la commission académique a été positif. Il a éclairci une évidence trompeuse et résolu la controverse d'un point de vue scientifique. Il a aussi fait progresser la science de la nutrition et enrichi la chimie de nouvelles découvertes. Surtout, malgré les pressions des défenseurs de la gélatine, il a été mené selon des critères scientifiques. Devant les interrogations que suscitait la nutrition elle-même, Magendie n'a pas hésité à reprendre à zéro les expériences sur la gélatine, quitte à allonger la durée de l'étude et à étendre son champ d'investigation.

Aujourd'hui, le paysage des controverses scientifiques (perturbateurs endocriniens, pesticides, additifs alimentaires, scandales médicamenteux...) est plus compliqué, car il dépasse en général les frontières et subit des pressions plus nombreuses et puissantes. Toujours et mieux qu'hier, les scientifiques ont un rôle clé à jouer pour répondre rationnellement aux questions soulevées dans ces controverses et aider les citoyens à faire la part des choses entre science et politique. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Papadopolou, **Le problème physiologique de la nutrition et ses enjeux**, Hermann, 2018.

C. Lieffroy, **Une nouvelle branche d'industrie : l'art d'extraire la gélatine des os dans la première moitié du XIX^e siècle**, *Documents pour l'histoire des techniques*, n° 14, pp. 37-48, 2007.

C. Viel et J. Fournier, **Histoire des procédés d'extraction de la gélatine et débats des commissions académiques (XIX^e siècle)**, *Revue d'histoire de la pharmacie*, n° 349, pp. 7-28, 2006.

R

ENDEZ-VOUS

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

RANGER AU MIEUX DES CARRÉS, DES CERCLES...

Disposer des formes géométriques identiques dans le plus petit espace possible: les problèmes de ce type attirent non seulement les amateurs de récréations mathématiques, mais aussi des chercheurs de métier.

L'AUTEUR



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



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

Ranger 9 carrés de côté 1 dans un carré aussi petit que possible est facile: il faut un carré de côté 3, et on ne peut évidemment pas placer les 9 carrés unitaires dans un carré de côté plus petit.

Pour faire tenir 8 carrés unitaires, faut-il un carré de côté 3, ou le pourrait-on avec un carré plus petit? Si oui, quel est le plus petit carré permettant ce rangement? Et si l'on souhaite ranger 7 carrés, ou 6, ou 5, faut-il toujours un carré de côté 3?

La réponse est que pour placer 8 carrés unitaires, on doit utiliser un carré de côté 3, et que c'est encore vrai pour 7 ou 6 carrés unitaires. En revanche, pour 5 carrés unitaires, il suffit d'un carré de côté $2 + 1/\sqrt{2} = 2,707...$, et l'on a démontré qu'on ne peut pas faire mieux.

Les dessins de l'encadré ci-contre énumèrent les résultats connus aujourd'hui jusqu'à l'entier 26. La valeur du paramètre s indiquée sous chaque rangement est la longueur du côté du grand carré où ont été placés les carrés unitaires. Pour 12, 13, 16, 20, 21, 22, 23, les dessins (non représentés) sont faciles à deviner et correspondent aux rangements en lignes de carrés côte à côte. On remarquera qu'il y a deux sortes de résultats: ceux connus avec certitude, une démonstration ayant prouvé qu'on ne peut pas utiliser un carré de

côté plus petit, et ceux qui sont simplement des records: on n'a pas trouvé mieux aujourd'hui, mais on n'a pas prouvé que le résultat était optimal.

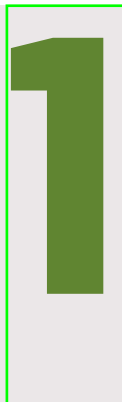
Une page internet mise en place par Erich Friedman, de l'université Stetson, en Floride, donne les résultats connus pour d'autres valeurs de n (<https://www2.stetson.edu/~efriedma/squinsqu/>).

Pour parler simplement de cette famille de problèmes, on introduit la notation suivante: pour tout entier n , on note $s(n)$ la longueur du côté du plus petit carré permettant de ranger sans chevauchement n carrés unitaires. Quand le dessin représenté est démontré optimal, on a une égalité; quand le dessin représenté est seulement le meilleur connu à ce jour, on a une inégalité. L'encadré 1 se résume alors à une série d'égalités et d'inégalités:

$s(1)=1$, $s(2)=s(3)=s(4)=2$, $s(5)=1+1/\sqrt{2}$,
 $s(6)=s(7)=s(8)=s(9)=3$, $s(10)=3+1/\sqrt{2}$,
 $s(11) \leq 3,877...$, $s(12) \leq 4$, $s(13) \leq 4$,
 $s(14)=s(15)=s(16)=4$, $s(17) \leq 4,6756$,
 $s(18) \leq (7+\sqrt{7})/2$, $s(19) \leq 3+4\sqrt{2}/3$, $s(20) \leq 5$,
 $s(21) \leq 5$, $s(22) \leq 5$, $s(23)=s(24)=s(25)=5$,
 $s(26) \leq 7/2+3/\sqrt{2}$.

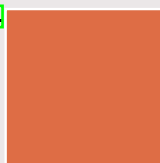
Ce type de problèmes peut sembler insignifiant et tout juste bon à amuser les amateurs de récréations mathématiques. Ce n'est pas le cas: le célèbre et prolifique mathématicien

RANGER AU MIEUX DES CARRÉS DANS UN CARRÉ



On se donne n carrés de côté 1 (carrés unitaires) et on cherche à les placer dans un carré le plus petit possible. Voici les résultats les meilleurs connus aujourd'hui pour n variant de 1 à 26 (s désigne la longueur du côté du carré dessiné, et l'échelle change à chaque dessin).

$n = 1$



$s = 1$
(immédiat)

2



$s = 2$
(démontré par Frits Göbel en 1979)

3



$s = 2$
(démontré par F. Göbel en 1979)

4



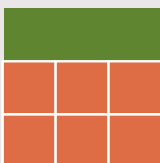
$s = 2$
(immédiat)

5



$s = 2 + 1/\sqrt{2} = 2,707...$
(démontré par F. Göbel en 1979)

6



$s = 3$
(démontré par Michael Kearney et Peter Shiu en 2002)

7



$s = 3$
(démontré par Erich Friedman en 1999)

8



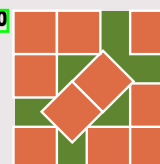
$s = 3$
(démontré par E. Friedman en 1999)

9



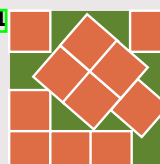
$s = 3$
(immédiat)

10



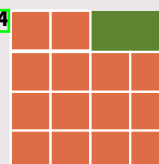
$s = 3 + 1/\sqrt{2} = 3,707...$
(démontré par Walter Stromquist en 1979)

11



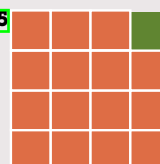
$s = 3,877...$
(trouvé par Walter Trump en 1979)

14



$s = 4$
(démontré par E. Friedman en 1999)

15



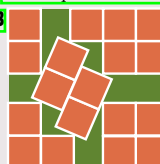
$s = 4$
(démontré par E. Friedman en 1999)

17



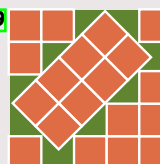
$s = 4,675...$
(trouvé par John Bidwell en 1997)

18



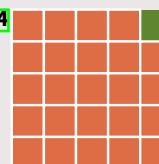
$s = (7 + \sqrt{7})/2 = 4,822...$
(trouvé par Pertti Hämäläinen en 1979)

19



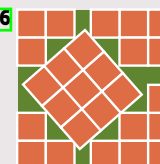
$s = 3 + 4\sqrt{2}/3 = 4,885...$
(trouvé par Robert Wainwright en 1979)

24



$s = 5$
(démontré par E. Friedman en 1999)

26



$s = 7/2 + 3/\sqrt{2} = 5,621...$
(trouvé par E. Friedman en 1997)

d'origine hongroise Paul Erdős s'y est intéressé avec son collègue Ronald Graham. En 1975, ils publièrent un article entièrement consacré à cette question des rangements optimaux de carrés identiques dans un carré.

UNE DOUBLE INÉGALITÉ FACILE

Les premiers résultats généraux concernant ces rangements sont faciles: $s(n^2) = n$ et $\sqrt{n} \leq s(n) \leq \lceil \sqrt{n} \rceil + 1$, où $\lceil x \rceil$ représente la partie entière de x , c'est-à-dire le plus grand entier inférieur ou égal à x (par exemple, $\lceil 3,14 \rceil = 3$). La double inégalité nous indique ainsi que $10 \leq s(105) \leq 11$, car $\sqrt{105} = 10,2469...$

L'affirmation $s(n^2) = n$ est facile: quand on veut placer n^2 carrés unitaires dans un carré, il faut, pour des raisons d'aire, au moins un carré de côté n ; on a donc $s(n^2) \geq n$. Un tel carré suffit évidemment, donc $s(n^2) = n$.

La première inégalité du second résultat provient aussi de la contrainte sur les aires: si on veut placer n carrés unitaires dans un carré de

côté r , il faut que l'aire du carré soit supérieure ou égale à n , soit $r^2 \geq n$; autrement dit, $\sqrt{n} \leq r$.

Pour la seconde inégalité, on utilise que, par définition, $\sqrt{n} < \lceil \sqrt{n} \rceil + 1$. En élevant au carré, il vient $n < (\lceil \sqrt{n} \rceil + 1)^2$. Si l'on construit des lignes de $(\lceil \sqrt{n} \rceil + 1)$ carrés unitaires serrés les uns contre les autres et qu'on empile ces lignes, on aura épuisé les n carrés unitaires avant d'avoir terminé la ligne $\lceil \sqrt{n} \rceil + 1$. Cela signifie que les n carrés unitaires tiennent dans le carré de côté $\lceil \sqrt{n} \rceil + 1$ et donc que $s(n) \leq \lceil \sqrt{n} \rceil + 1$.

LA PLACE PERDUE

Pour un nombre réel positif s donné, Paul Erdős et Ronald Graham se sont demandé combien au maximum on peut placer de carrés unitaires dans un carré de côté s , et quelle est alors la place perdue. L'aire $A(s)$ de cette place perdue est:

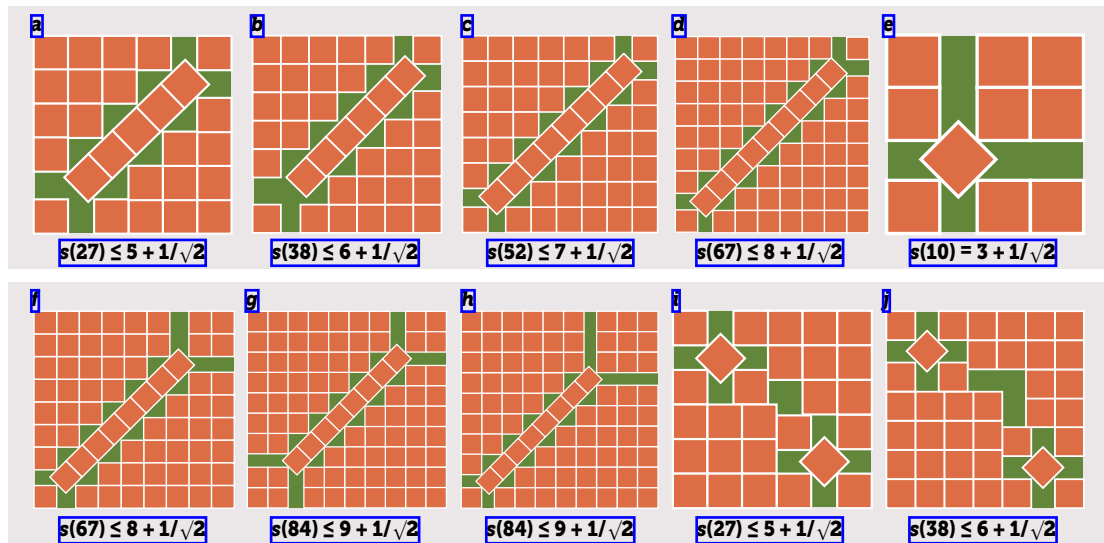
$$A(s) = s^2 - \text{maximum} \{n; s(n) \leq s\}.$$

Dans leur article de 1975, les deux mathématiciens ont montré par une construction

2

UNE DIAGONALE EFFICACE

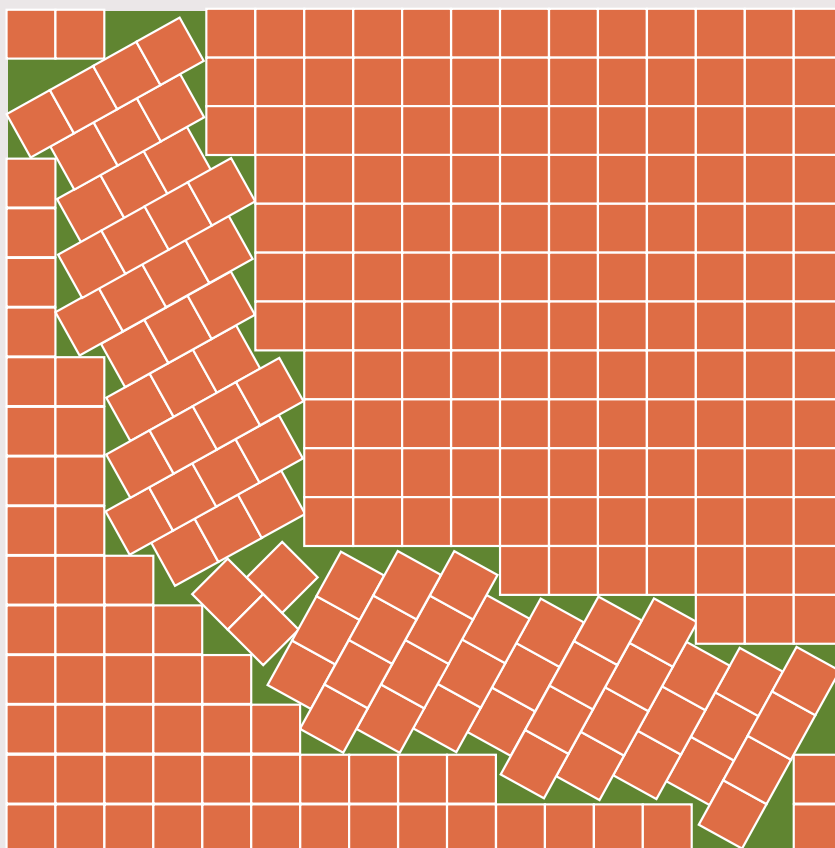
Utiliser une diagonale de carrés pivotés de 45° donne assez souvent la meilleure façon de ranger des carrés dans un carré plus grand. Tel est le cas (a, b, c, d) pour $n = 27, 38, 52, 67$. Parfois, on peut limiter le nombre de carrés tournés, soit aux extrémités de la diagonale (e, f, g, h), soit par des aménagements plus subtils (i, j).



3

LE CAS GÉNÉRAL DE $N^2 - K$ CARRÉS

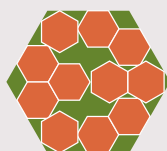
Michael Kearney et Peter Shiu ont démontré que pour ranger $n^2 - 1$ carrés unitaires, il faut un carré de côté n au moins : $s(n^2) = s(n^2 - 1) = n$. Il en est de même pour ranger $n^2 - 2$ carrés unitaires : $s(n^2 - 2) = n$. On a pensé un moment que le résultat restait vrai pour $n^2 - 3, n^2 - 4, \dots, n^2 - n$. Tous les rangements trouvés jusqu'à présent confirment l'exactitude de la conjecture jusqu'à l'entier $n = 16$. Mais pour $n = 17$, on sait que c'est faux grâce à un rangement (ci-contre) proposé par Lars Cleemann : un carré de côté inférieur à 17 permet de ranger $17^2 - 17 = 272$ carrés unitaires.



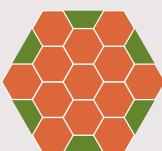
4

RANGER DES HEXAGONES DANS UN HEXAGONE

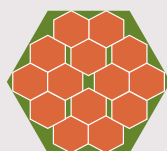
De même que l'on recherche des rangements optimaux de carrés dans des carrés, on peut rechercher des rangements optimaux d'hexagones identiques (de côté 1) dans un hexagone qui soit le plus petit possible. Voici quelques résultats trouvés en 2015 par Maurizio Morandi (sauf pour les cas triviaux $n = 12$ et $n = 13$).



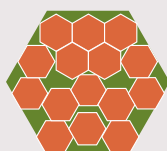
$$s(11) = \frac{5(3 + \sqrt{3})}{6} = 3,943...$$



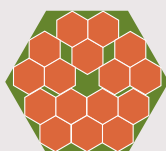
$$s(12) = s(13) = 4$$



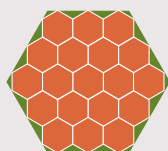
$$s(14) = \frac{37\sqrt{3}}{15} = 4,272...$$



$$s(15) = \frac{73 + 35\sqrt{3}}{30} = 4,454...$$



$$s(16) = \frac{55\sqrt{3}}{21} = 4,536...$$



$$s(17) = s(18) = s(19) = \frac{8}{\sqrt{3}} = 4,618...$$

explicite que $A(s) \leq Cs^{7/11}$, où C est une constante positive. Ainsi, l'aire non recouverte est relativement petite comparée à l'aire du carré s^2 . L'article précise qu'on ne peut pas exclure l'existence d'une majoration de $A(s)$ par une constante D , c'est-à-dire que $A(s) \leq D$. Jugeant cela improbable, les chercheurs indiquaient qu'une conjecture plus raisonnable serait que $A(s) \leq Es^{1/2}$ pour une certaine constante E .

Depuis, Klauss Roth and Robert Vaughan, de l'Imperial College de Londres, ont démontré qu'il n'existe pas de constantes $K > 0$ et $\epsilon < 1/2$ telles que $A(s) \leq Ks^\epsilon$. L'hypothèse $A(s) \leq D$ est donc maintenant exclue. Autrement dit, l'espace perdu en rangeant des carrés unitaires dans un carré de côté s , même en s'y prenant au mieux, dépasse n'importe quelle constante fixée à l'avance : pour certaines valeurs de s , le meilleur rangement laissera par exemple une aire d'un million d'unités non couverte. Reste la conjecture $A(s) \leq Es^{1/2}$, qui attend d'être démontrée ou infirmée.

DANS CERTAINS CAS, FAIRE PIVOTER QUELQUES CARRÉS

Pour certains entiers n , obtenir le meilleur rangement exige de faire pivoter quelques carrés unitaires (voir les encadrés 1 et 2). Pour les petites valeurs de n , l'angle de rotation de ces carrés est toujours de 45° , ce qui explique les $\sqrt{2}$ dans les valeurs de s trouvées. Une question naturelle vient à l'esprit : faut-il parfois faire pivoter des carrés de façon plus compliquée, c'est-à-dire d'un angle différent de 45° ?

La réponse apparaît pour $n=11$, dont le meilleur rangement connu utilise des carrés unitaires tournés d'un angle de $40,182^\circ$. Cette solution proposée pour $n=11$ n'a pas été démontrée optimale, ce n'est qu'un record. L'Américain Walter Stromquist a cependant prouvé en 1984 que $n=11$ est la plus petite valeur de n qui oblige à utiliser un angle de rotation autre que 45° (c'était une conjecture énoncée par Martin Gardner).

Pour obtenir de bons rangements, le Néerlandais Frits Göbel a proposé en 1979 une technique simple et efficace : disposer une diagonale de carrés tournés de 45° . Cette méthode montre que $k^2 + k + 3 + [(k-1)\sqrt{2}]$ carrés unitaires se rangent dans un carré de côté $k + 1 + 1/\sqrt{2}$, grâce à une bande oblique de carrés tournés de 45° . Pour toutes les valeurs de k , sauf 3 et 6, cela donne le meilleur rangement connu. Pour $n = 10$, 67 et 84, il est possible d'économiser quelques rotations de carrés aux extrémités de la bande oblique. Mieux et plus subtil, David Cantrell remarqua en 2005 qu'il existe pour $n=27$, 38 et 52 des rangements équivalents, pour la densité, à la méthode de la bande oblique (voir l'encadré 2), mais utilisant moins de carrés pivotés.

RANGEMENTS POUR $N^2 - 1, N^2 - 2, \dots, N^2 - N$ CARRÉS

Pour ranger n^2 carrés unitaires, il faut nécessairement un carré de côté n (pour une raison d'aire). Il se trouve que c'est encore vrai pour $n^2 - 1$ et $n^2 - 2$ carrés : $s(n^2 - 1) = s(n^2 - 2) = n$. Cette fois, ce n'est pas évident du tout, mais Michael Kearney et Peter Shiu, de l'université de Loughborough, au Royaume-Uni, l'ont démontré en 2002.

Il a aussi été conjecturé plus généralement que lorsque n est assez petit, on a : $s(n^2) = s(n^2 - 1) = s(n^2 - 2) = \dots = s(n^2 - n)$. L'idée est qu'enlever un carré à un ensemble de n^2 carrés unitaires ne permet pas de les ranger dans un carré de côté inférieur à n , et qu'il en va de même quand on enlève 2 carrés, 3 carrés, ..., n carrés.

Tous les rangements trouvés jusqu'à présent confirment l'exactitude de la conjecture jusqu'à l'entier $n=17$. En revanche, pour $n=17$, on connaît un étonnant rangement de $17^2 - 17 = 272$ carrés unitaires dans un carré de côté strictement inférieur à 17. Il est dû à Lars Cleemann (voir l'encadré 3).

On trouvera d'autres exemples de beaux rangements non triviaux dans l'article d'Erich Friedman mentionné dans la bibliographie.

5

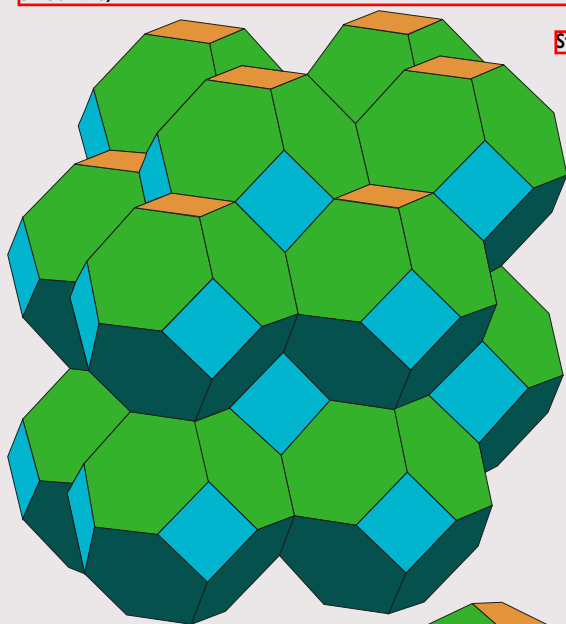
LES STRUCTURES DE KELVIN
ET DE WEAIRE-PHELAN

En 1887, lord Kelvin réfléchissait au problème du pavage de l'espace par n cellules de même volume le remplissant parfaitement. On connaît plusieurs polyèdres qui pavent l'espace parfaitement, le cube étant le plus simple. Kelvin se demandait quel était celui ayant la surface la plus petite. Il proposa un polyèdre aujourd'hui appelé « structure de Kelvin ». Cette forme a été considérée optimale

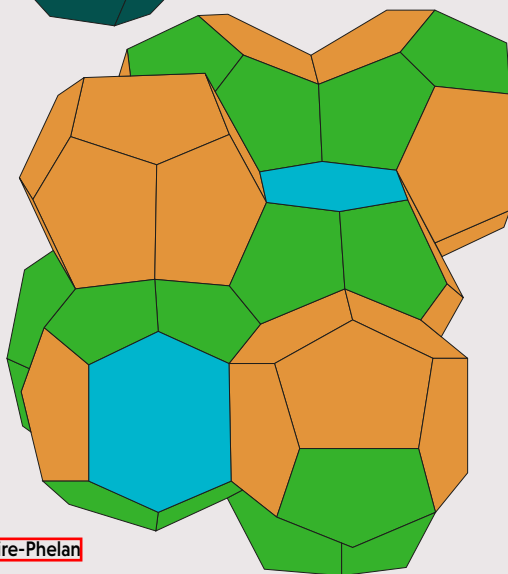
jusqu'en 1993, date à laquelle les physiciens Denis Weaire et Robert Phelan ont découvert une structure un peu meilleure. On la nomme bien sûr « structure de Weaire-Phelan ». Elle est composée de deux formes différentes de même volume.

Ces structures intéressent les architectes (voir <https://archpaper.com/2012/05/tomas-saracenos-cloud-city/>). Elles sont aussi importantes dans l'étude des mousses (voir T. Daxner et al., « Space-filling polyhedra as mechanical models for solidified dry foams », *Materials Transactions*, vol. 47(9), pp. 2213-2218, 2006, article téléchargeable sur <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/09/2213.pdf> ou sur http://orbit.dtu.dk/files/87595654/Space_filling_polyhedra.pdf).

On trouve sur le site internet de Guy Inchbald les patrons de la construction des deux bulles de la structure de Weaire-Phelan (<http://www.steelpillow.com/polyhedra/wp/wp.htm>). La structure de Weaire-Phelan a inspiré la conception du Centre aquatique des jeux de Pékin en 2008 (voir la photographie page ci-contre).



Structure de Kelvin



Structure de Weaire-Phelan

Avec d'autres formes
géométriques

Le merveilleux et très complet site internet d'Erich Friedman (<https://www2.stetson.edu/~efriedma/packing.html>) énumère une multitude d'autres résultats au sujet des rangements de formes géométriques dans une forme géométrique. On y trouve par exemple la liste des résultats connus pour :

- le rangement de n cercles de rayon 1 dans un cercle aussi petit que possible ;
- le rangement de n carrés de côté 1 dans un cercle aussi petit que possible ;
- le rangement de n triangles équilatéraux de côté 1 dans un carré aussi petit que possible.

L'encadré 4 montre quelques records récents trouvés pour le rangement d'hexagones réguliers de côté 1 dans un hexagone régulier. Plusieurs ont été découverts par Maurizio Morandi, un amateur italien vivant à Modène. Ils prouvent que, dans la liste infinie d'énigmes de rangement géométrique, il est possible à toute personne un peu décidée et soigneuse de trouver de meilleurs rangements que ceux connus. Si, un jour d'ennui, vous souhaitez ajouter une pierre à l'édifice des mathématiques en train de se faire, consultez le site d'Erich Friedman pour connaître les derniers records et attaquez-vous à l'un d'eux pour une valeur de n assez grande. Une autre méthode consiste à écrire un programme informatique comme il en existe déjà quelques-uns. Voir par exemple : <https://www.wolframalpha.com/examples/mathematics/geometry/packing-and-covering-problems/geometric-packing-in-2d/>

RANGEMENTS DANS LE PLAN
ET L'ESPACE ENTIER

Lorsque, à la place des rangements géométriques dans un espace fermé et limité, on s'interroge sur les rangements géométriques optimaux dans le plan ou l'espace tout entier, on tombe sur un domaine mathématique aux résultats souvent simples à énoncer, mais dont les démonstrations sont si délicates et difficiles que certaines ne sont maîtrisées que depuis peu ou sont même encore recherchées. Voici les cinq plus intéressants problèmes géométriques de rangement du plan et de l'espace, avec l'état actuel des avancées.

Théorème de Thue. La façon la plus dense de disposer des disques de rayon 1 dans le plan est le rangement hexagonal (les centres des disques sont placés comme les centres des hexagones dans le classique pavage du plan par des hexagones). La densité de ce rangement le plus serré possible est $\pi/\sqrt{12} = 0,906899...$

En 1773, Lagrange démontra ce résultat, mais en n'envisageant que des dispositions périodiques des disques et donc sans prendre en compte d'éventuelles dispositions irrégulières. En 1910, le mathématicien norvégien Axel Thue, en incluant cette fois toutes les



Le Centre aquatique de Pékin, la nuit. Il a été construit pour les jeux Olympiques de 2008.

dispositions possibles, régulières ou non, proposa une nouvelle démonstration du résultat. Sa démonstration est considérée incomplète et la preuve définitive du théorème fut donnée par le Hongrois László Tóth en 1940.

Théorème des nids d'abeilles. La façon de paver le plan par des pavés de même forme, d'aire unité et dont le périmètre soit le plus petit possible est le pavage classique du plan par des hexagones (pavage en nid d'abeilles). Pappus d'Alexandrie, au IV^e siècle de notre ère, considérait que les abeilles utilisent cette forme pour leur ruche car c'est celle qui, pour une quantité de cire donnée, est la plus économique pour renfermer une certaine quantité de miel. Pour Charles Darwin, ce sont les mécanismes de la sélection naturelle qui ont conduit les abeilles à cette solution optimale.

Le résultat mathématique est difficile à démontrer, car là encore il faut prendre en compte les réseaux irréguliers et établir qu'aucun ne peut être meilleur que le réseau hexagonal. Le théorème n'a été démontré qu'en 1999 par l'Américain Thomas Hales.

Le théorème de Kepler-Hales. La façon la plus dense de ranger des sphères dans l'espace a pour densité $\pi/3\sqrt{2} = 0,74048...$ Les marchands, par exemple, l'utilisent pour leurs étales d'oranges ou de pommes.

Resté longtemps une conjecture sous le nom de « conjecture de Kepler », le théorème a été établi par Thomas Hales en 1998. Pour certaines parties de la démonstration, il utilisait des programmes informatiques. Comme un doute persistait sur la validité de ces travaux, on a recherché une preuve formelle, telle que chaque pas de raisonnement soit contrôlé par un assistant de preuve informatique. Le projet, intitulé Flyspeck et conduit par Thomas Hales lui-même, a abouti en 2014, en produisant cette preuve formelle considérée aujourd'hui comme satisfaisante.

La conjecture de rangement d'Ulam. Il n'existe pas de forme convexe bornée de l'espace donnant lieu à un rangement optimum moins bon en densité qu'avec la sphère.

Cette conjecture n'est pas démontrée. Il faut être attentif à ce qu'elle affirme: pour chaque forme convexe bornée de l'espace (par exemple un cube, un tétraèdre, un ballon de rugby...), on considère la façon optimale de disposer des exemplaires dans l'espace, et on affirme que la forme dont le rangement optimal est le moins bon en densité est la sphère. Le rangement optimal pour la sphère est donné par le théorème de Kepler-Hales et a une densité de $\pi/3\sqrt{2}$. La conjecture affirme donc que toute forme bornée et convexe de l'espace peut donner lieu à un rangement de densité supérieure ou égale à $\pi/3\sqrt{2}$.

Le problème de Kelvin. En 1887, lord Kelvin se demanda comment découper l'espace en bulles de même volume et en ne laissant aucun espace entre elles de telle façon que la surface de chaque bulle soit minimale (c'est l'analogue dans l'espace du problème du nid d'abeilles). Il proposa un polyèdre comportant 8 faces hexagonales et 6 faces carrées. Pendant un siècle, personne ne proposa de structure meilleure que celle de Kelvin. Mais en 1993, les physiciens Denis Weaire et Robert Phelan, du Trinity College, à Dublin, découvrirent à l'aide d'un calcul d'ordinateur une nouvelle structure composée de deux formes de même volume répondant au problème et meilleure que celle de Kelvin de 0,3%. On n'a pas encore démontré que la structure de Weaire-Phelan est optimale (voir l'encadré 5).

Pour ces problèmes de rangement, l'ordinateur est indispensable, aussi bien pour découvrir de nouvelles formes et rangements que pour assurer que les démonstrations trouvées sont correctes. Le mathématicien aura encore besoin de ce nouvel ami. ■

BIBLIOGRAPHIE

Weaire-Phelan structure, Wikipedia, consulté en 2018 (https://en.wikipedia.org/wiki/Weaire-Phelan_structure).

W. Bentz, Optimal packings of 22 and 33 unit squares in a square, prépublication arXiv:1606.03746, 2016.

E. Friedman, Packing unit squares in squares : A survey and new results, *The Electronic Journal of Combinatorics*, 2009 (<https://www2.stetson.edu/~efriedma/papers/squares/squares.html>).

M. Gardner, Mathematical Games, *Scientific American*, octobre 1979 (compléments donnés en novembre 1979, mars et novembre 1980). Repris dans : M. Gardner, *Fractal Music, Hypercards and More*, W. H. Freeman and Company, pp. 289-306, 1991.

F. Göbel, Geometrical packing and covering problems, dans *Packing and Covering in Combinatorics*, A. Schrijver (ed.), Math. Centre Tracts, vol. 106, pp. 179-199, 1979.

P. Erdős et R. Graham, On packing squares with equal squares, *Journal of Combinatorial Theory A*, vol. 19, pp. 119-123, 1975.

L'AUTEUR



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

ENTRER DANS LA LUMIÈRE

***Platonium*, œuvre en trois volets conçue pour l'année internationale de la lumière, rend hommage aux travaux scientifiques où la lumière est essentielle, qu'elle soit outil ou objet d'étude.**

Lorsque l'Unesco décréta que 2015 serait l'Année internationale de la lumière et des technologies fondées sur la lumière, le CNRS a souhaité un événement à la hauteur mettant en valeur la recherche en la matière. Elle en confia la conception à l'artiste Éric Michel, qui se définit lui-même comme « passeur de lumière ». Avec Akari Lisa Ishii, de l'agence Icon, ils se sont rapprochés des laboratoires de la région lyonnaise afin de fêter dignement, et scientifiquement, la lumière. C'est ainsi que l'université de

Lyon, avec en particulier l'université Claude-Bernard, ainsi que les laboratoires de recherche ILM, Ircelyon et Cral, ont été embarqués dans l'aventure *Platonium*.

Présentée pour la première fois à la fête des Lumières de Lyon en 2016, l'œuvre a ensuite beaucoup voyagé : Bright Brussels Festival en février 2017, Fiesta de la Luz, à Quito, en Équateur, en août 2017... et dernièrement, à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, en octobre 2018, à l'occasion de la 17^e édition de la Nuit blanche.

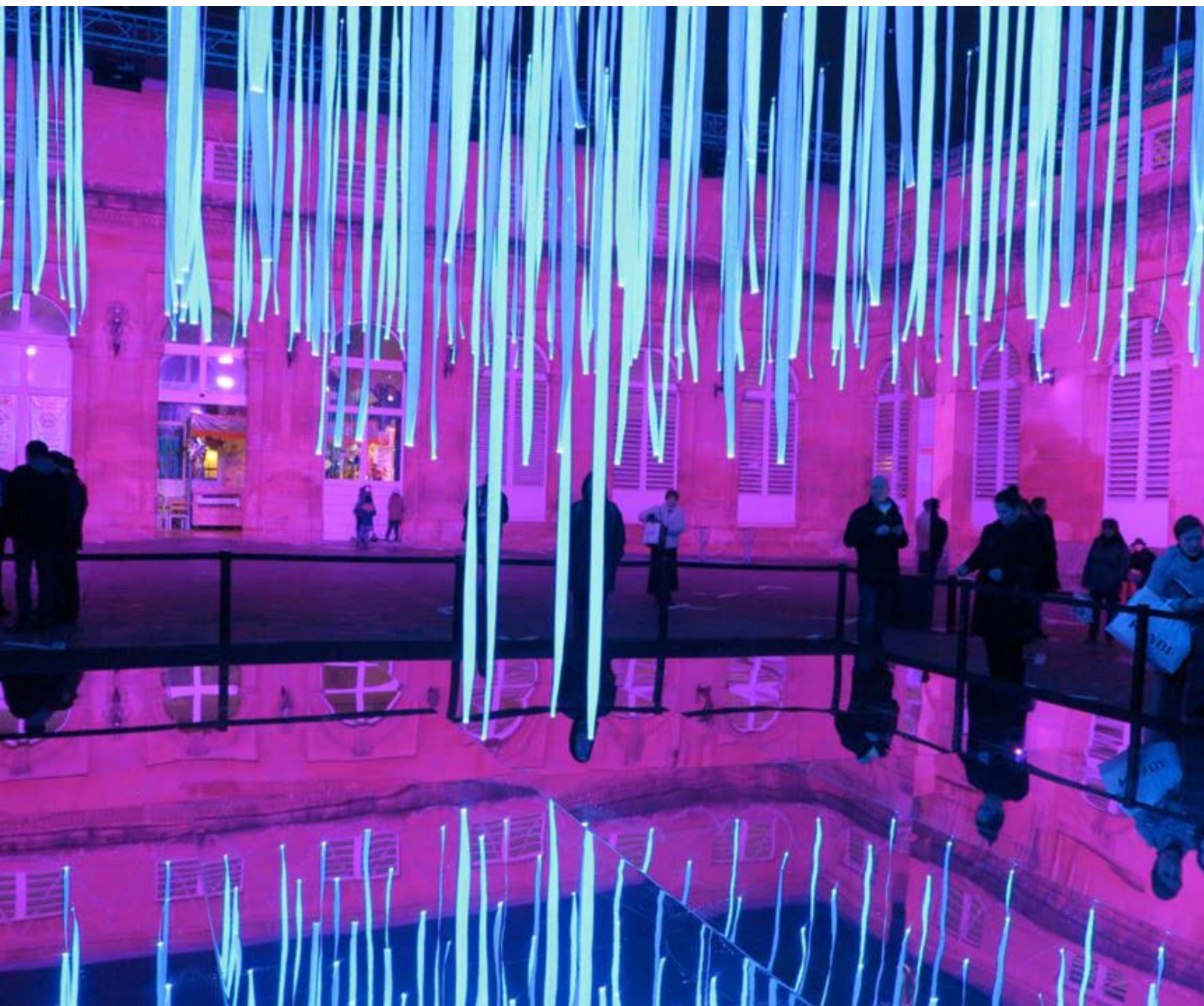
Platonium se décompose en trois volets. Le premier est l'*Atrium*, qui propose une déambulation, dans une quasi-obscurité, au milieu de seize écrans diffusant des images issues de laboratoires, sélectionnées tant pour leur qualité esthétique et hypnotique que pour les recherches qu'elles évoquent. Pêle-mêle, on peut voir des cristaux excités par une lumière prendre une coloration ou une luminescence particulière, des

Le *Vortex*, un des volets de *Platonium*, est fait de lamelles de tissus mêlant fibres optiques et fibres classiques.

nanoparticules d'or fabriquées par ablation laser, l'évolution d'une faille tectonique reproduite en laboratoire, la galaxie NGC 4650A vue du *Very Large Telescope*, au Chili... Cet *Atrium* est un clin d'œil à *Zapping Zone*, une installation du réalisateur Chris Marker conçue pour l'exposition « Passages de l'image », au Centre Pompidou en 1990. Ici, le zapping est réinterprété avec des images scientifiques.

Puis vient le *Vortex* (voir la photo ci-dessus), où 324 lamelles lumineuses bleues flottent, suspendues, et se reflètent dans un miroir au sol. L'ensemble est baigné d'une lumière magenta. Ces deux couleurs, le bleu et le magenta, sont les





signatures d'Éric Michel. Les lamelles sont en fait des fibres optiques tissées avec des fibres synthétiques selon un procédé mis au point par la société lyonnaise Brochier Technologies et appliqué à la soie.

Ces tissus lumineux sont notamment utilisés en milieu hospitalier pour soigner la jaunisse du nourrisson: on en confectionne des gigoteuses qui illuminent doucement et uniformément le bébé. Dans le secteur de l'automobile, ils sont à la base de divers dispositifs rétroéclairants.

Enfin, troisième volet, la *Stèle* consiste en un *ready made*, faite des mêmes tissus lumineux que le *Vortex*. Il s'agit pourtant là d'un système de

dépollution! Sur quel principe? Les bandelettes sont enduites d'un photocatalyseur qui, sous l'effet de la lumière, aide à nettoyer aussi bien l'eau que l'air, et même les gaz de pot d'échappement.

Au total, le visiteur est immergé dans une œuvre de lumière qui, sans volonté d'être didactique, le transporte dans un univers d'émotions. Et pourtant, c'est de recherche scientifique de pointe qu'il est entouré!

Au fait, pourquoi *Platonium*? Ce nom renvoie au mythe de la caverne de Platon dans lequel des hommes enchaînés au fond d'une grotte ne perçoivent d'eux et du monde que des ombres projetées sur

les parois. Un jour, un homme se libère et découvre la vérité. Désormais éclairé, il revient près des siens et partage sa connaissance nouvelle. Les scientifiques ne sont-ils pas ici des passeurs de leur savoir? Dans l'allégorie de Platon, celui qui revient est très mal accueilli, ses congénères refusant de le croire. Rien de tel avec *Platonium*. ■

Pour en savoir plus :
www.cnrs.fr/platonium/



L'auteur a récemment 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

DÉPRESSIONS SUR TERRE... ET DANS L'ÉVIER

Sur la planète, la direction des vents autour d'une dépression ou d'un anticyclone est déterminée par l'accélération dite de Coriolis. Selon une idée reçue, il en serait de même pour le sens du tourbillon dans un récipient qui se vide...

Le sens de rotation de l'eau dans un tourbillon d'évier dépend-il de l'hémisphère dans lequel on se situe ? Théorie et expériences répondent que non. On invoque souvent, comme origine de ce prétendu phénomène, l'accélération de Coriolis due à la rotation de la Terre sur elle-même. Comme nous le verrons, cette accélération est bien trop faible pour avoir un quelconque effet sur les écoulements de taille modeste. En revanche, elle a une influence sur les écoulements à l'échelle de la planète : elle détermine le sens de rotation des dépressions et des anticyclones et la direction des vents.

QUESTION DE POINT DE VUE

Pour saisir ce qu'est l'accélération de Coriolis, autant l'expérimenter par soi-même, par exemple dans le manège inertiel de la Cité des sciences et de l'industrie,

à Paris. Il s'agit d'une salle cylindrique close, sans aucune vue vers l'extérieur, mise en rotation si modérée (4 tours par minute) que la force centrifuge n'est pas perceptible. Tant que l'on reste immobile, on n'a donc pas conscience que le manège tourne. En revanche, dès que l'on marche, on ressent une force qui déporte nos jambes et qui est d'autant plus intense que nous nous déplaçons vite. De même, la trajectoire d'une balle (ou autre projectile) lancée à travers la salle est déviée latéralement, toujours dans le même sens, quelle que soit la direction du lancer.

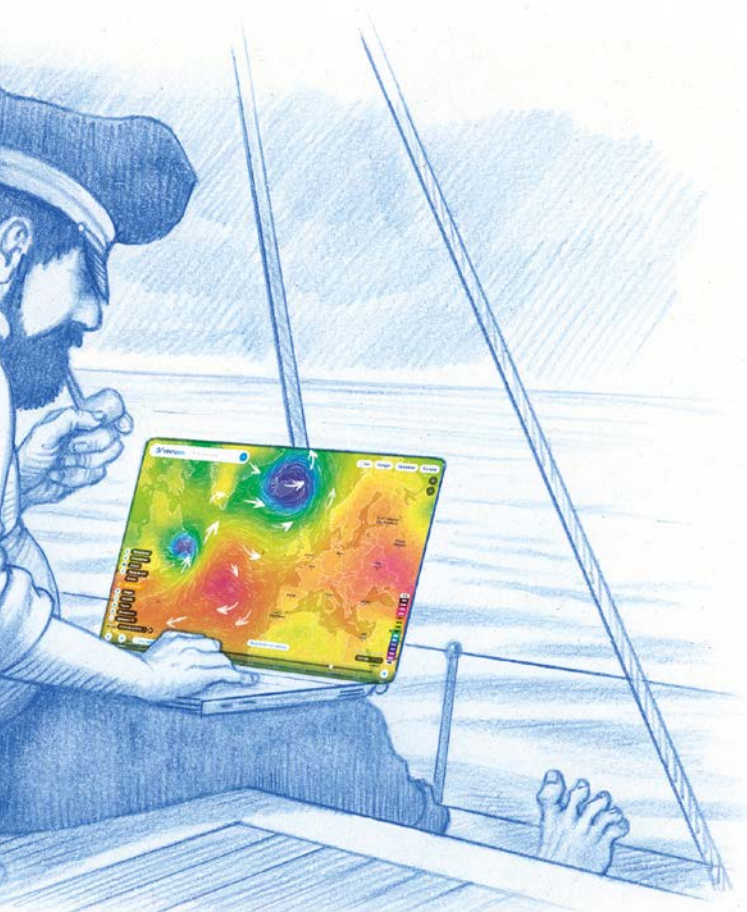
D'où vient cette déviation ? Pour le comprendre, changeons d'établissement et rendons-nous quelques kilomètres plus loin au palais de la Découverte, où le manège inertiel est grand ouvert. Pour un observateur extérieur, les trajectoires (en projection horizontale) des balles sont toutes droites (voir l'encadré page ci-contre) : si un expérimentateur placé au

Dans l'hémisphère Nord, autour d'un anticyclone (en rouge sur la carte de météorologie marine), les vents tournent dans le sens horaire. C'est l'inverse autour d'une dépression (en bleu foncé).

centre du manège vise une cible à la périphérie et lance droit vers elle la balle, la vitesse initiale vue de l'extérieur est bien dirigée vers sa cible ; mais pendant le parcours rectiligne de la balle, la cible bouge et sera manquée !

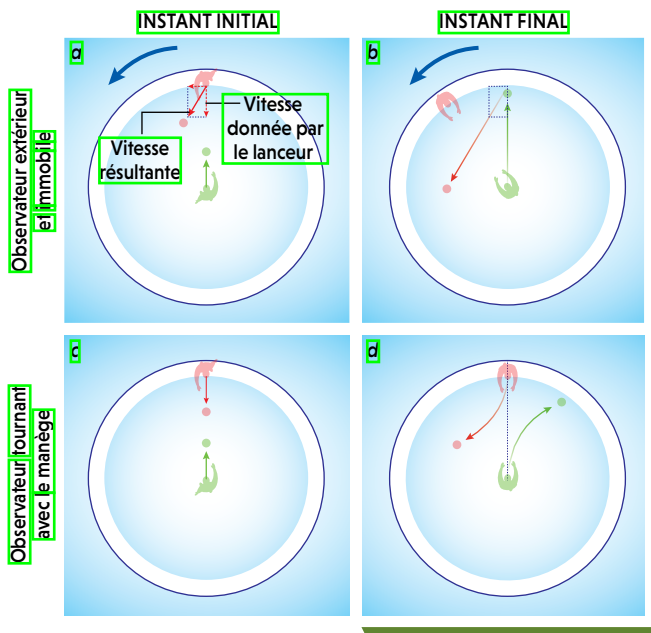
Pour la personne à l'intérieur, en revanche, la cible est immobile et c'est la balle qui est déviée. A *contrario*, si un expérimentateur à la périphérie vise une cible au centre, l'observateur extérieur verra que la vitesse initiale de la balle est la résultante de la vitesse imprimée de l'intérieur à la balle, correctement orientée vers la cible, et de la vitesse de l'expérimentateur en rotation. Elle sera donc





EFFETS DE MANÈGE

On considère deux personnes tournant dans un manège, l'une positionnée au centre, l'autre à la périphérie. A un instant donné, chacune lance une balle en direction de l'autre. La description des trajectoires diffère selon que l'on adopte le point de vue d'un observateur extérieur au manège et immobile (a et b), ou le point de vue d'un observateur solidaire du manège (c et d). Vues d'un observateur extérieur, les trajectoires des ballons dans le plan horizontal sont rectilignes. Vues d'un observateur tournant avec le manège, les deux trajectoires sont déviées vers leur droite si le manège tourne dans le sens antihoraire. La situation est analogue pour les déviations des vents dans l'hémisphère Nord.



de biais par rapport à la direction de la cible: encore raté!

Dans cet exemple, on a l'impression que la simplicité est du côté de l'observateur immobile, tandis que l'expérimentateur, en rotation, doit invoquer des accélérations supplémentaires, appelées accélérations d'inertie, pour interpréter les phénomènes. Pourquoi alors ne pas s'en tenir au point de vue de l'observateur?

On n'a parfois pas le choix, notamment lorsqu'on vit sur Terre qui, comme un manège, tourne sur elle-même. Que nous importe alors le régime des vents par rapport à des étoiles fixes: on veut

connaître leurs mouvements par rapport au sol. Ces derniers sont, pour l'essentiel, horizontaux. Mais contrairement au cas du manège, l'axe de rotation terrestre n'est pas dirigé selon la verticale du lieu, sauf aux pôles. Cela complique la description des mouvements, y compris pour un observateur extraterrestre et immobile.

ACCÉLÉRATIONS CENTRIFUGE ET DE CORIOLIS SUR TERRE

Restons donc sur notre Terre qui tourne. Pour décrire les mouvements des objets à sa surface, il faut, à l'accélération qui résulte des forces usuelles, ajouter deux accélérations d'inertie: d'une part,

l'accélération centrifuge, égale au produit de la vitesse du sol (due à la rotation) par la vitesse angulaire de rotation de la Terre; d'autre part, l'accélération de Coriolis, égale à deux fois le produit vectoriel de la vitesse de l'objet (par rapport au sol) par cette même vitesse angulaire de rotation.

On peut noter trois choses. Premièrement, la direction de l'accélération centrifuge ne dépend pas du sens de rotation, contrairement à celle de l'accélération de Coriolis. Deuxièmement, l'accélération centrifuge est nulle au pôle et atteint 0,03 mètre par seconde carrée (m/s^2) à l'équateur. Autrement dit, elle est au moins 300 fois plus faible que l'accélération due à l'attraction gravitationnelle de la Terre. L'accélération de ce que

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



> nous appelons la pesanteur est la résultante des deux. La direction que définit un fil à plomb n'est donc pas tout à fait celle de la force de gravitation terrestre.

Troisièmement, l'accélération de Coriolis paraît très faible par rapport aux valeurs précédentes. À la vitesse d'un TGV, elle n'atteint, sous nos latitudes, que $0,01 \text{ m/s}^2$ en raison de la faible vitesse angulaire de rotation de la Terre ($4,2 \text{ millidegrés}$ par seconde). L'accélération de Coriolis se manifesterait-elle donc uniquement sous la forme de corrections à des mouvements contrôlés par d'autres forces?

Pas lors des phénomènes météorologiques que sont les anticyclones et les dépressions, régions où la pression est respectivement plus élevée ou plus basse que la pression atmosphérique moyenne. La différence de pression entre le centre et la périphérie provoque en effet un mouvement d'air radial, équivalent à celui de la balle dans nos manèges inertiels.

Estimons l'accélération engendrée par les variations de pression. Comme la pression varie typiquement d'une cinquantaine d'hectopascals sur un millier de kilomètres, soit 5 millipascals par mètre, cela conduit, en divisant cette valeur par la masse volumique de l'air (environ 1 kg/m^3), à une accélération de l'air de $0,005 \text{ m/s}^2$. Or c'est la valeur de l'accélération de Coriolis pour des vents de 50 mètres par seconde. Ces deux accélérations sont donc comparables et, comme dans le manège, l'accélération de Coriolis se traduit, dans l'hémisphère Nord, par une déviation vers la droite du mouvement.

LE VENT TOURNE!

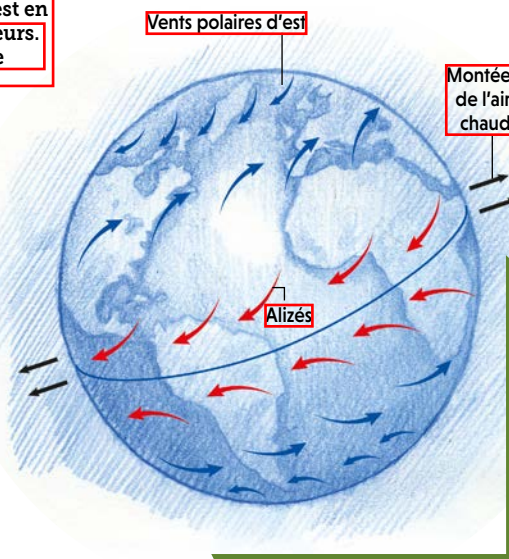
Dans cet hémisphère, pour un anticyclone où l'air circule du centre vers la périphérie, cette déviation entraîne un mouvement de rotation des vents autour du centre dans le sens horaire. Dans une dépression, en revanche, où l'air s'engouffre vers le centre, la rotation des vents est de sens antihoraire. Les sens sont inversés dans l'hémisphère Sud.

C'est aussi l'accélération de Coriolis qui détermine le sens des alizés. Au niveau de l'équateur, l'air, plus chaud qu'ailleurs, est moins dense et s'élève. Il s'ensuit une aspiration d'air depuis les zones de faibles latitudes vers l'équateur. Ce mouvement est dévié vers la droite et les vents vont donc d'est en ouest au voisinage de l'équateur, dans l'hémisphère Nord comme dans l'hémisphère Sud.

La déviation de Coriolis agit aussi sur les courants marins. Dans la Manche, par

ROTATION DE LA TERRE ET VENTS DOMINANTS

Au niveau de l'équateur, l'air est en moyenne plus chaud qu'ailleurs. Cet air est donc moins dense et tend à s'élever, par poussée d'Archimède. Il en résulte des mouvements d'air des latitudes voisines en direction de l'équateur : les alizés. En raison de l'accélération de Coriolis, ces vents sont déviés vers leur droite dans l'hémisphère Nord, et vers leur gauche dans l'hémisphère Sud : dans les deux cas, ce sont donc des vents soufflant vers l'ouest. De façon analogue, les pôles, où l'air est plus froid, sont la source de vents dirigés vers les latitudes moins élevées.



exemple, lorsque la mer monte, l'onde de marée remonte ce canal naturel vers le nord-est. L'accélération de Coriolis déporte l'onde vers la droite, donc vers la France; on peut en effet constater qu'au-delà de l'effet majeur de la physiologie des côtes, l'eau monte beaucoup plus à Dunkerque qu'à Portland, et inversement lors de la marée basse.

Revenons pour finir à l'évier qui se vide de son eau. Évaluons les accélérations. La forme de la surface liquide indique la présence d'une dépression au centre. Le dénivelé de la hauteur d'eau étant de l'ordre de 1 centimètre, on en déduit que la variation de pression au fond de l'évier est de 100 pascals sur une distance d'environ 1 centimètre, soit 10 000 pascals par mètre, d'où une accélération de 10 m/s^2 . Cette accélération vers le trou est largement compensée par l'accélération centrifuge due au mouvement circulaire de l'eau sur un rayon de quelques centimètres, mouvement dont la vitesse est de quelques centimètres par seconde.

En revanche, l'accélération de Coriolis, produite de cette vitesse par celle de la rotation de la Terre, vaut quelque 10^{-5} m/s^2 . Ainsi, en étant un million de fois plus faible que les autres accélérations mises en jeu, elle peut être masquée par la moindre petite perturbation. Le sens de rotation de l'eau lorsqu'elle s'évacue est donc dû soit aux très faibles mouvements initiaux de l'eau, soit à la forme de l'évier (ou de la baignoire). ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Moatti, **Le Mystère Coriolis**, CNRS Éditions, 2014 (sur Gaspard-Gustave de Coriolis et son œuvre).

A. Persson, **How do we understand the Coriolis force ?**, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79(7), pp. 1373-1385, 1998.

T. Gourieux, **Cours de dynamique du point**, dans *Mécanique du point*, université de Lorraine, sur <http://physique.dep.univ-lorraine.fr/>

**DURÉE
LIBRE**

4/ MERCI DE JOINDRE IMPERATIVEMENT UN RIB Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

L'AUTEUR



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

LE LEGO DE LA COAGULATION SANGUINE

Chez les vertébrés, la coagulation sanguine est finement régulée par une série d'enzymes agissant en cascade. Ces enzymes, distinctes, ont toutes une fonction précise. Pourtant, elles se ressemblent étrangement... Ou comment l'évolution joue au Lego.

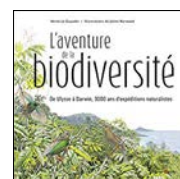
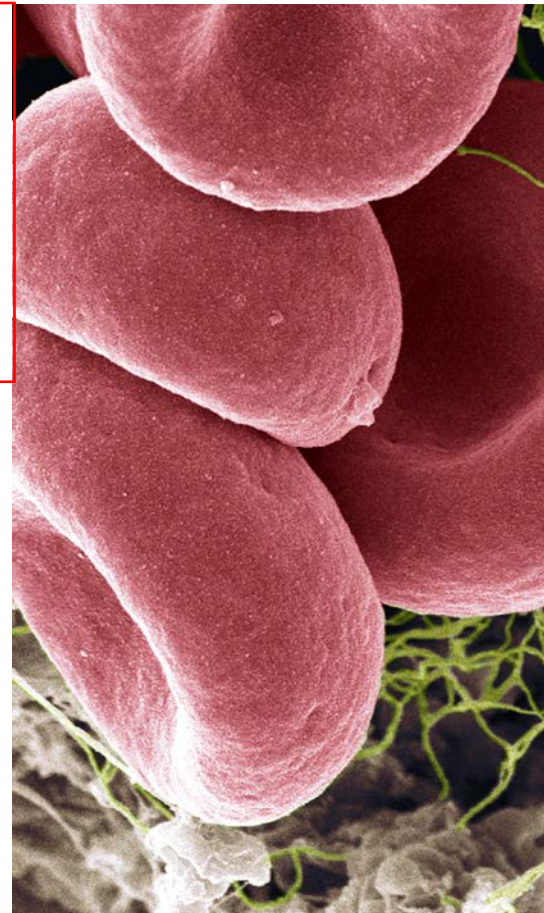
Aux États-Unis, le «dessein intelligent» (*intelligent design*), une version plus sophistiquée du créationnisme, affirme que les «complexes irréductibles» ne peuvent être le résultat d'évolutions biologiques: «Ils ne peuvent être produits directement [...] par de petites modifications successives, puisque tout précurseur d'un complexe irréductible dont il manque une partie est par définition non fonctionnel.» (*Darwin's Black Box*, Michael Behe, 1996). À l'appui, les adeptes du dessein intelligent citent souvent le flagelle bactérien, le cil de la cellule eucaryote, l'explosion cambrienne... et la coagulation sanguine chez les vertébrés. Pas de chance, les évolutionnistes ont largement décortiqué ces exemples, et ont notamment prouvé que le système de la coagulation sanguine est loin d'être irréductible.

On ne compte que peu de groupes d'animaux dont le système sanguin est clos, c'est-à-dire dont le sang ne sort pas du système cardiovasculaire. Parmi eux, les annélides, les céphalopodes, les

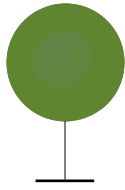
némertes, les échinodermes et, bien sûr, les vertébrés. On y voit des avantages, en particulier la possibilité de mettre le liquide sanguin sous pression et de le faire circuler rapidement. Mais ce système a un gros inconvénient, sa fragilité: une hémorragie peut avoir des conséquences tragiques. Un tel système n'est donc pas viable sans un mécanisme efficace qui colmate les brèches. Ce mécanisme, la formation d'un caillot, nécessite de plus un contrôle parfait, car autant l'absence d'un caillot lors d'une hémorragie peut être catastrophique, autant sa formation imprévue dans le circuit clos peut amener de lourds dommages.

UNE CASCADE D'ENZYMES

Chez les vertébrés, lors d'une hémorragie, l'hémostase se réalise en deux étapes. En premier lieu, un clou plaquettaire se forme par adhésion de plaquettes sanguines circulant dans le sang. En second lieu, le fibrinogène, une glycoprotéine soluble du plasma sanguin, se transforme en fibrine, une protéine insoluble qui polymérise en formant un filet autour



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



Hématie ou globule rouge
Taille: environ 7 μm de diamètre

EN CHIFFRES

1 546

C'est le nombre de gènes humains qui ont subi au moins un brassage d'exons – soit 6,5% du nombre total de gènes dans le génome humain (23 686). L'apolipoprotéine A, un transporteur de lipides chez l'humain, résulte d'un grand nombre de brassages: elle compte 80 modules bretzel.

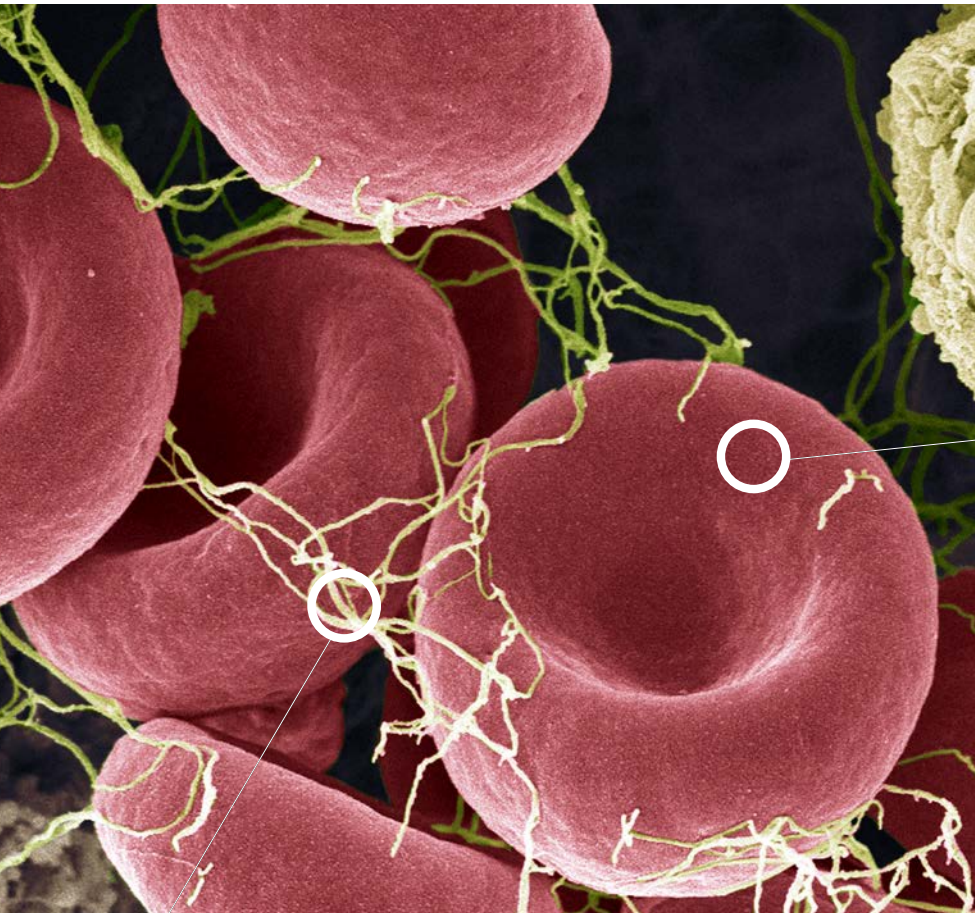
53 millions

Tous organismes confondus, on connaît environ 53 millions de modules protéiques différents, classés en 2700 familles.

430

millions d'années

La coagulation sanguine des vertébrés serait apparue avant la divergence des poissons téléostéens du reste du groupe, il y a plus de 430 millions d'années: les téléostéens ont un système de coagulation sanguine similaire à ceux des mammifères et des oiseaux.



Dépourvus de noyau chez les mammifères, les globules rouges distribuent l'oxygène dans tous les tissus de l'organisme en véhiculant dans le sang son transporteur, l'hémoglobine.

Lors d'une hémorragie, une protéine, la fibrine, forme localement des filaments qui piègent les globules rouges dans la région atteinte. Ceux-ci renforcent l'agréat de plaquettes sanguines qui avait stoppé le saignement. L'ensemble constitue un caillot sanguin.

du clou plaquettaire et des globules rouges localement agrégés. Ce mécanisme est activé *via* la libération d'ions calcium par les plaquettes et les cellules lésées et prend la forme d'une cascade d'une dizaine de réactions enzymatiques, qui, en cassant quelques liaisons peptidiques, convertissent des protéines inactives en enzymes actives. Ces enzymes appartiennent à la famille des protéases à sérine, qui coupent les protéines à l'aide d'une région où un acide aminé particulier (une sérine) joue un rôle déterminant.

Dès 1985, László Patthy, à l'université de Budapest, a comparé les séquences de ces enzymes avec celles d'autres protéases à sérine connues, comme la trypsine ou la

chymotrypsine. Il a ainsi montré que les protéases de la coagulation sanguine, dites hémostatiques, ont toutes, d'un côté de leur séquence, le domaine enzymatique typique des protéases à sérine et, de l'autre, des extensions plus ou moins grandes selon les molécules, qui ne sont autres que des combinaisons de modules protéiques déjà bien connus par ailleurs: module facteur de croissance (*EGF domain*), module liant le calcium en présence de vitamine K (*GLA domain*), domaine « bretzel » (*kringle domain*), domaines fibronectine de types 1 et 2, domaine « pomme » (*PAN domain*). Or tous ces domaines ont des fonctions bien définies – reconnaissance de substrats, accrochage aux membranes, interaction avec des cofacteurs protéiques – et contribuent à la régulation des activités des enzymes.

Comment expliquer un tel assemblage? En examinant la structure des gènes dont ces protéases sont les produits. La séquence codante d'un gène n'est pas d'un seul tenant: elle est éclatée en séquences codantes partielles, les exons, séparées par des séquences non codantes, les introns.

➤ Lors de la transcription de l'ADN en ARN messager, l'ensemble des exons et des introns sont copiés dans l'ARN messager, puis les introns sont éliminés (on parle d'épissage). Or, chez les protéases de la coagulation sanguine, chaque module correspond à un exon (voir l'encadré ci-contre)! Ainsi, le jeu de Lego de ces enzymes est en fait la conséquence d'un jeu de Lego d'exons qui s'est réalisé dans le génome.

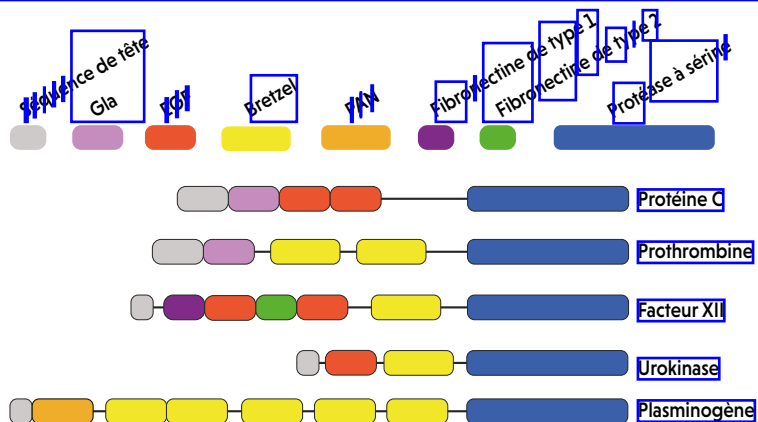
DES EXONS QUI S'EMBOÎTENT

Les gènes hémostatiques appartiennent à une même famille et sont avant tout le résultat de duplications géniques: lors de la méiose (la division cellulaire qui conduit à la formation des gamètes), il arrive que des portions du génome soient dupliquées. Dans le cas des gènes hémostatiques, de telles duplications ont abouti, au fil de l'évolution, à l'incorporation de nouveaux exons, ce qui a doté les protéines associées de propriétés régulatrices nouvelles. Dès 1978, au moment de la découverte de la structure des gènes en exons et introns, le biochimiste américain Walter Gilbert avait postulé l'existence d'un «brassage d'exons» susceptible de conduire à un tel jeu de Lego. Partant de cette hypothèse, László Patthy et Russell Doolittle, de l'université de Californie à San Diego, ont indépendamment réussi, à la fin des années 1980, à décrypter la chronologie des duplications géniques et des ajouts d'exons des gènes hémostatiques.

Par ailleurs, une analyse phylogénétique fine a permis de rapprocher, d'un point de vue évolutif, certaines protéases hémostatiques (prothrombine, protéine C...) d'autres protéines qui présentent une région ressemblant au domaine enzymatique des protéases à sérine: l'haptoglobine et deux protéines dites du complément, C1r et C1s. Or ces protéines sont toutes des nettoyeuses: l'haptoglobine circule dans le plasma sanguin, où elle aide à éliminer l'hémoglobine inutilisable, libérée lorsque des globules rouges sont détruits, en se fixant sur elle. De leur côté, les protéines C1r et C1s sont des acteurs du système immunitaire inné: le complément est un complexe de protéines qui circule aussi dans le plasma, où il contribue à la défense immunitaire, notamment en lysant des agents pathogènes tels que des bactéries. Le système de coagulation sanguine faisait-il donc originellement partie du système immunitaire inné? Une étude publiée en 2011 renforce cette idée: Heiko Herwald, de l'université de Lund, en Suède, et ses collègues ont montré que

DES PROTÉINES MOSAÏQUES

Les enzymes qui conduisent à la coagulation sanguine et à la production de fibrine sont toutes construites sur le même modèle: un domaine enzymatique (en bleu) de type protéase à sérine, qui coupe les protéines, et une succession de modules parmi les suivants: un module Gla (en mauve) liant le calcium en présence de vitamine K, un module facteur de croissance EGF (en rouge), un module «bretzel» (en jaune, qui doit son nom à sa forme), un module PAN (en orange) et deux modules fibronectine de type 1 (en violet) et 2 (en vert). Dans les gènes qui codent ces protéines, chaque module correspond à une région codante partielle nommée exon. Chacun de ces gènes est ainsi une mosaïque d'exons (ci-dessous), laquelle produit ces enzymes mosaïques.



des streptocoques emprisonnés dans un caillot sont eux aussi lysés.

DES MODULES ACQUIS AU FIL DU TEMPS

L'ensemble de ces données suggère le scénario suivant. Le système ancestral de la coagulation sanguine devait jouer un double rôle: immobiliser les bactéries et parasites invasifs et empêcher l'hémorragie. Puis une série de duplications de gènes suivies de spécialisations liées au brassage d'exons a conduit à deux systèmes séparés: d'une part, des protéines spécialisées dans l'élimination des cellules ou protéines destinées à être détruites et, d'autre part, la cascade des protéases hémostatiques.

Dans ce dernier cas, l'acquisition du domaine liant le calcium a été déterminante. En effet, les cellules lésées et le clou plaquettaire libèrent localement du calcium. En régulant certaines protéases hémostatiques, le calcium concentre l'activité coagulative dans la région où il a été libéré. La concentration en calcium diminuant vite dès que l'on s'éloigne de la blessure, le caillot se forme ainsi seulement dans la région du traumatisme vasculaire. N'en déplaise aux défenseurs du dessein intelligent, il est donc tout à fait possible de décrire les étapes de construction de la coagulation sanguine. Tous fonctionnels, ses précurseurs ont abouti à un complexe qui n'avait, *de facto*, rien d'irréductible. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Loof et al., **Coagulation, an ancestral serine protease cascade, exerts a novel function in early immune defense**, *Blood*, vol. 118 (9), pp. 2589-2598, 2011.

R. Doolittle, **Step-by-step evolution of vertebrate blood coagulation**, *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, vol. LXXIV, pp. 35-40, 2009.

L. Patthy, **Evolution of the proteases of blood coagulation and fibrinolysis by assembly from modules**, *Cell*, vol. 41, pp. 657-663, 1985.

ERRATUM

Une erreur s'est glissée dans la chronique du n° 493, **Comment l'éléphant trompe le cancer. L'éléphant des savanes compte 37 millions de milliards de cellules et non 37 millions (voir l'encadré « En chiffres »).**

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€	79€ Au lieu de 114,40€	99€ Au lieu de 174,40€
	29 % de réduction *	31 % de réduction *	43 % de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG19STD



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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE
DÉCOUVERTE**
• 12 n° du magazine papier
59€
Au lieu de 82,80€
- ☐ **FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
79€
Au lieu de 114,40€
- ☐ **FORMULE
INTÉGRALE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
• Accès illimité aux contenus en ligne
99€
Au lieu de 174,40€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

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

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

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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

L'AUTEUR



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

UN CAFÉ QUI A PLUS DE GOÛT QUE LE CAFÉ

Quelques astuces physicochimiques permettent de renforcer le goût des aliments. Illustration avec un expresso plus goûteux qu'un expresso, mais pas plus amer...

Comment donner du goût aux aliments? En choisissant des ingrédients qui ont du goût ou en assaisonnant, ce qui revient au même, puisque l'on choisit alors des ingrédients, épices ou aromates, aux goûts puissants. Ou bien en cuisant: les réactions qui sont déclenchées par la chaleur produisent des composés souvent très odorants ou sapides, tel le 5-hydroxyméthylfurfural que l'on récupère dans la plupart des cuissons et qui a, précisément, ce «goût de cuit»; pensons aussi au caramel, à la croûte du pain, par exemple.

Mais encore? Des humoristes ont moqué à tort le plus blanc que blanc des lessives: ils ignoraient, ou voulaient ignorer, que les lessives peuvent être additionnées d'agents «azurants». Ces derniers absorbent le rayonnement ultraviolet de la lumière blanche et le transforment en rayonnements de longueur d'onde visible, lesquels s'ajoutent au spectre de la lumière blanche, ce qui produit donc plus qu'une simple réflexion.

En cuisine? Bien sûr, on peut utiliser de tels composés, tels des acides aminés ou divers polyphénols, mais la question n'est pas une question visuelle. C'est une question de goût: quelle serait la transposition au goût de l'emploi d'azurants?

Examinons un exemple, pour fixer les idées. Préparons-nous un petit café expresso, bien serré. Comment augmenter son «goût»? La réponse est dans la question, ou, plus exactement, dans l'analyse du mot «goût», sensation complexe qui résulte de l'ensemble des perceptions d'odeur (notamment rétronasale, par les fosses à l'arrière de la bouche), de saveur

On réalise un expresso «augmenté» en y émulsionnant de l'huile où du café moulu a infusé.



(sur les papilles), trigéminales (de piquant et de frais)... Remarquons tout d'abord que les composés odorants volatils sont les premiers à être extraits, mais que, surtout, la mousse surmontant la solution aqueuse est une... mousse, ce qui signifie que la surface de contact avec l'air est considérablement augmentée: alors qu'au-dessus d'une tasse de café sans mousse, les composés odorants ne s'évaporent que par quelques centimètres carrés, avec la mousse la surface d'échange atteint un mètre carré!

Mieux encore? Concentrer le café à des limites, parce que l'on concentre en réalité la solution aqueuse, avec des composés phénoliques et des alcaloïdes variés (tels que la caféine, la trigonelline...), ce qui rendra amère la boisson.

Une piste d'amélioration se dessine devant quiconque s'intéresse à l'extraction liquide-liquide, procédé par lequel les chimistes séparent des composés en les répartissant entre deux solvants non miscibles, ou à l'enfleurage, procédé utilisé par l'industrie des parfums pour dissoudre l'odeur des fleurs dans une matière grasse neutre. Et, de fait, je vous invite à mettre du café moulu dans de l'huile pendant plusieurs jours: les grains libèrent progressivement leur odeur et l'on obtient une huile très parfumée. De quelle façon l'utiliser?

Tout simplement en ajoutant à la boisson de café quelques composés tensioactifs (de la gélatine, par exemple), avant d'y disperser l'huile chargée d'odeur de café. On obtient alors une émulsion, où la surface d'échange eau-huile est très grande, et l'avantage supplémentaire que l'huile qui tapissera la bouche lors de la dégustation du café emportera sur les muqueuses ces composés odorants qui auront été extraits. Cet expresso aura finalement plus le goût de café que l'expresso classique.

Bien sûr, le procédé est généralisable: à vos casseroles!



LA RECETTE

- 1 Dans un litre d'huile neutre (huile de pépins de raisin, par exemple), laisser infuser 250 grammes de café moulu pendant une semaine.
- 2 Préparer un expresso serré.
- 3 Y dissoudre un peu de gélatine ou de poudre de blanc d'œuf, ou un blanc d'œuf.
- 4 Ajouter l'huile de café goutte à goutte, en fouettant comme pour obtenir une mayonnaise.
- 5 Servir chaud.

Variante: si l'on a utilisé de la poudre de blanc d'œuf ou du blanc d'œuf, on peut passer le café «renforcé» au four à microondes afin de faire coaguler les protéines. On obtient ainsi une sorte de soufflé au café.

DES SAVANTS SUR LES PLANCHES

**UN.E SCIENTIFIQUE
+
DES ARTISTES**

**CHROMATIQUES BUBBLES,
OU LA DANSE DES FILMS DE SAVON**
avec la physicienne Florence Elias
5 février à 20h45

JONGLERIE, AUTOMATES ET COMBINATOIRE
avec le mathématicien et informaticien Florent Hivert
2 avril à 20h45

FACE À LA LUMIÈRE
avec l'astrophysicien Jean Lilenstein
28 mai à 20h45

LA PHYSIQUE DU PETIT MONDE
avec le physicien Patrick Tabeling
11 juin à 20h45

2 bis, passage Ruelle, 75018 Paris
Métro La Chapelle ou Marx Dormoy / Bus 65 et 35
Informations et réservations :
01 40 05 06 96
reineblanche.com

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P. 54

JPEG 2000

Cette norme de compression des images offre une bien meilleure qualité que la norme JPEG, car elle est fondée sur une décomposition du signal en ondelettes et non en fonctions cosinus.

P. 38

RUAPEHU

Le mont Ruapehu est un volcan à trois sommets situé sur l'île nord de la Nouvelle-Zélande. Comme le lac du cratère se remplit d'eau entre les éruptions, cela en fait un instrument de surveillance très sensible via sa température et les gaz qui le traversent.

P. 7

« En termes d'années de vie perdues, l'impact des infections à bactéries résistantes – près de 900 000 années – équivaut à celui de la grippe, de la tuberculose et du sida cumulés »

MÉLANIE COLOMB-COTINAT
épidémiologiste de Santé publique France

P. 26

33 %

En Chine, le taux de mortalité chute de plus d'un tiers avant une fête traditionnelle. On retrouve ce phénomène chez les chrétiens ou les juifs avant leurs fêtes.

P. 64

PSEUDOSUCHIENS

Ces grands reptiles, proches des crocodiles, ont dominé leurs cousins dinosaures jusqu'à la fin du Trias, il y a environ 200 millions d'années. Issus d'ancêtres de la taille d'un chat, les « terribles lézards » ont mis 30 millions d'années à s'imposer.

P. 74

FIBRINE

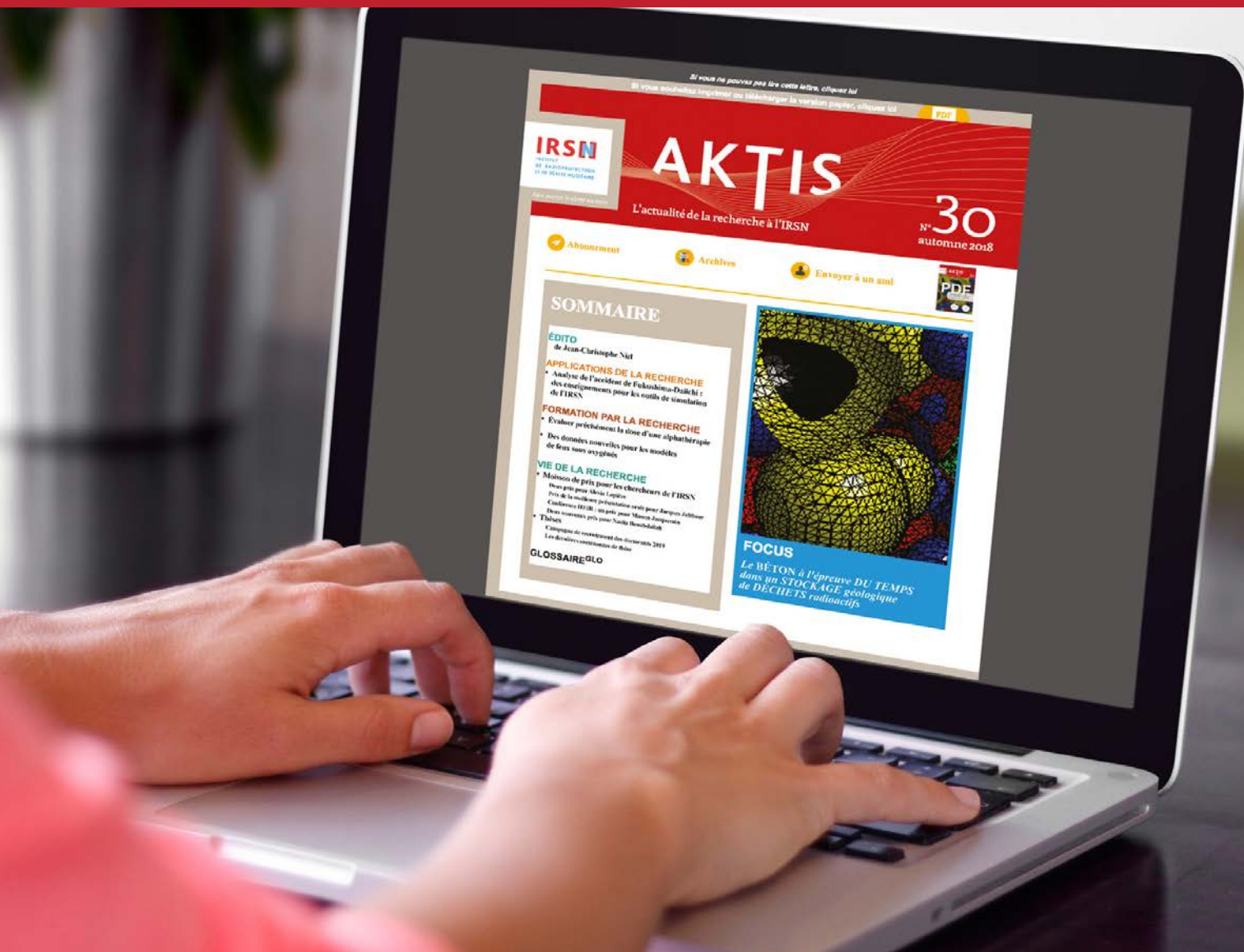
Au XIX^e siècle, on la connaissait comme un constituant de base des muscles. Le médecin François Magendie étudia son pouvoir nutritif sur des chiens, qui montrèrent vite des signes de malnutrition. Lors de l'autopsie d'un animal mort d'inanition, il trouva dans son corps un gramme de fibrine malgré le kilogramme avalé la veille...

P. 88

LAVABO

Dans un lavabo, le sens de rotation de l'eau lorsqu'elle s'évacue est dû soit aux très faibles mouvements initiaux de l'eau, soit à la forme de la vasque. Mais pas à l'effet de l'accélération de Coriolis, due à la rotation de la Terre: elle est un million de fois plus faible que les autres accélérations en jeu.

L'actualité de la recherche à l'IRSN



Informez-vous sur la recherche
en sûreté nucléaire et en radioprotection :

Abonnez-vous sur

[irsnn.fr/aktis](https://www.irsnn.fr/aktis)

 [irsnn.fr/aktis-EN](https://www.irsnn.fr/aktis-EN)

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses