

# POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

L 13256 - 515 - F: 6,90 € - RD



SEPTEMBRE 2020  
N° 515

ÉTHOLOGIE  
**DISTANCIATION  
SOCIALE : LES  
ANIMAUX AUSSI !**

MÉTÉOROLOGIE  
**DES PRÉVISIONS  
MÉTÉO JUSQU'À  
28 JOURS ?**

ARCHÉOLOGIE  
**DES ENFANTS  
CHIMÉS SACRIFIÉS  
PAR CENTAINES**

# Quand la SPINTRONIQUE s'inspire du cerveau



# 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](http://www.ademe.fr/theses)





**MAURICE MASHAAL**  
Rédacteur en chef

## DU SPIN POUR L'IA

**R**econnaitre des visages sur des photos, obéir à des instructions vocales, battre au go ou aux échecs des champions humains... Les performances actuelles des systèmes d'intelligence artificielle ont évidemment de quoi étonner. Mais il faut relativiser. Tout d'abord, ces systèmes se limitent le plus souvent à une tâche bien précise. On est loin de la polyvalence d'une intelligence de moustique (femelle) qui, avec un minuscule cerveau, sait repérer ses victimes, se cacher, éviter la main qui cherche à l'écraser, s'accoupler avec un mâle de la bonne espèce, pondre là où il faut...

Ensuite, les systèmes d'intelligence artificielle ne brillent pas par leur efficacité énergétique. Bien que fondés sur des réseaux de neurones artificiels, algorithmes qui imitent les propriétés des réseaux de neurones biologiques (ou du moins ce que l'on en sait), non seulement ils exigent d'énormes masses de données pour leur « apprentissage », mais ils consomment beaucoup plus d'énergie que notre cerveau pour des tâches équivalentes.

Cette gourmandise énergétique tient en partie au fait que les programmes d'intelligence artificielle sont exécutés sur des dispositifs classiques, où les informations sont stockées dans une mémoire physiquement séparée des processeurs qui les traitent. D'où d'incessants et énergivores va-et-vient des données entre les mémoires et les processeurs.

C'est pourquoi scientifiques et industriels cherchent à mettre au point des systèmes où le stockage des données se ferait au même endroit ou presque que leur traitement. Plusieurs pistes existent, mais Julie Grollier et Damien Querlioz nous décrivent l'une des plus prometteuses, avec ses premiers succès (voir pages 28 à 37): la spintronique, domaine de l'électronique qui tire profit du spin des électrons pour révéler des effets physiques originaux et de nouvelles applications.

On n'en est pas encore à reproduire sur une tête d'épingle un réseau neuronal aussi performant que celui d'un moustique. Mais on s'achemine tout de même vers une plus fidèle et plus efficace imitation du fonctionnement du cerveau.

# SOMMAIRE

N° 515 /  
Septembre 2020

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- Pourquoi l'embryon se développe toujours de la même façon
- Bisphénol A: des substituts tout aussi problématiques
- La source du point chaud de Hawaï se dévoile
- Dinosaures: des œufs d'abord mous
- Des poissons supernoirs
- Des feux de camp à la surface du Soleil
- Douleurs chroniques: de nouvelles pistes de traitement
- Xenon1T: un signal inattendu
- Énergie solaire tout-en-un
- Le pentadiamant, mieux que le diamant

P. 16

### LE LIVRE DU MOIS

L'Odyssée des gènes

P. 24

### HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

Un métro, une ligne après l'autre

Gilles Dowek

P. 26

### QUESTIONS DE CONFIANCE

OGM: une histoire juridiquement brouillée

Virginie Tournay



**En couverture :**  
© Vladgrin / shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

## GRANDS FORMATS



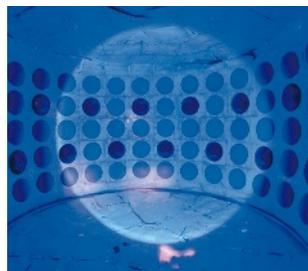
P. 40

### ÉTHOLOGIE

#### LES ANIMAUX AUSSI GARDENT LEURS DISTANCES

Dana Hawley et Julia Buck

Afin d'échapper à la maladie, divers animaux tels que des langoustes, des oiseaux, des fourmis ou des singes pratiquent la distanciation sociale... spontanément et sans directives administratives!



P. 48

### PHYSIQUE DES PARTICULES

#### À LA RECHERCHE DU NEUTRINO STÉRILE

William Charles Louis et Richard Van de Water

Les neutrinos existent en trois variétés. Seulement? Des indices suggèrent l'existence d'une quatrième. Cette hypothétique particule permettra-t-elle d'éclairer la question de la matière noire et de l'énergie sombre?



P. 56

### ARCHÉOLOGIE

#### LES ENFANTS SACRIFIÉS SUR L'AUTEL... D'EL NIÑO?

Nicolas Goepfert

Au nord du Pérou, sur la côte Pacifique, les archéologues ont mis au jour les traces d'un sacrifice pratiqué il y a plus de cinq siècles, dont les centaines de victimes étaient des enfants et de jeunes lamas. Une macabre cérémonie probablement motivée par des troubles météorologiques.



P. 66

### CLIMATOLOGIE

#### DES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES À 28 JOURS

Kathy Pegion

Prévoir le temps quatre semaines à l'avance? Les météorologues y arrivent de mieux en mieux, grâce à des superordinateurs et à une compréhension plus fine des phénomènes atmosphériques.



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](http://www.pourlascience.fr)



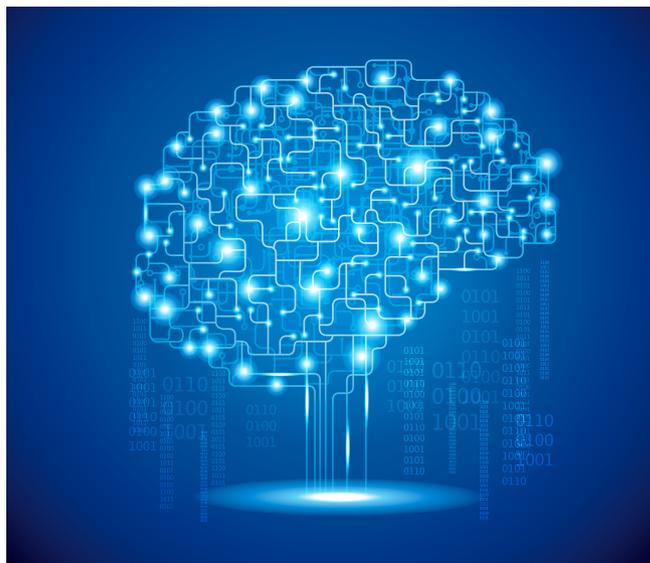
P. 74

**HISTOIRE DES SCIENCES**

## CONSTANTIN RAFINESQUE OU LES TRIBULATIONS D'UN NATURALISTE PEU ORDINAIRE

*Benoît Grison*

Des personnages atypiques, l'histoire ne retient souvent que les lubies. Mais l'excentricité de Constantin Rafinesque, négociant et naturaliste, ne saurait éclipser le rôle majeur qu'il a tenu dans l'histoire des sciences naturelles.



P. 28

**TECHNOLOGIE**

## QUAND LA SPINTRONIQUE S'INSPIRE DU CERVEAU

*Julie Grollier et Damien Querlioz*

En termes d'énergie, le cerveau est beaucoup plus efficace que les ordinateurs actuels pour mémoriser, calculer ou apprendre. Est-il possible de s'inspirer de cet organe pour réaliser des dispositifs plus performants? Oui, en s'appuyant sur le spin des électrons...

## RENDEZ-VOUS

P. 80

**LOGIQUE & CALCUL**

### CINQ PÉPITES MATHÉMATIQUES DE JOHN CONWAY

*Jean-Paul Delahaye*

Le grand mathématicien britannique vient de disparaître. Pour lui rendre hommage, voici un petit échantillon de mathématiques comme les aimait ce magicien des jeux et des nombres.

P. 86

**ART & SCIENCE**

### Le mystère du coquelicot de Monet

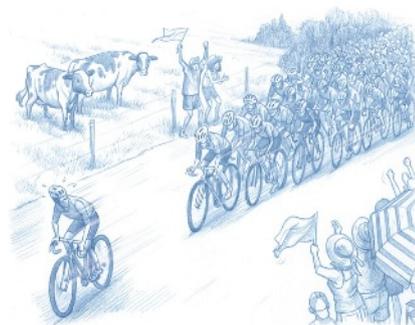
*Loïc Mangin*

P. 88

**IDÉES DE PHYSIQUE**

### Sucer la roue dans le peloton

*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*



P. 92

**CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION**

### L'eau, moteur de l'évolution

*Hervé Le Guyader*

P. 96

**SCIENCE & GASTRONOMIE**

### La tendance en sciences du goût

*Hervé This*

P. 98

**À PICORER**

# A

## CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.16 Le livre du mois

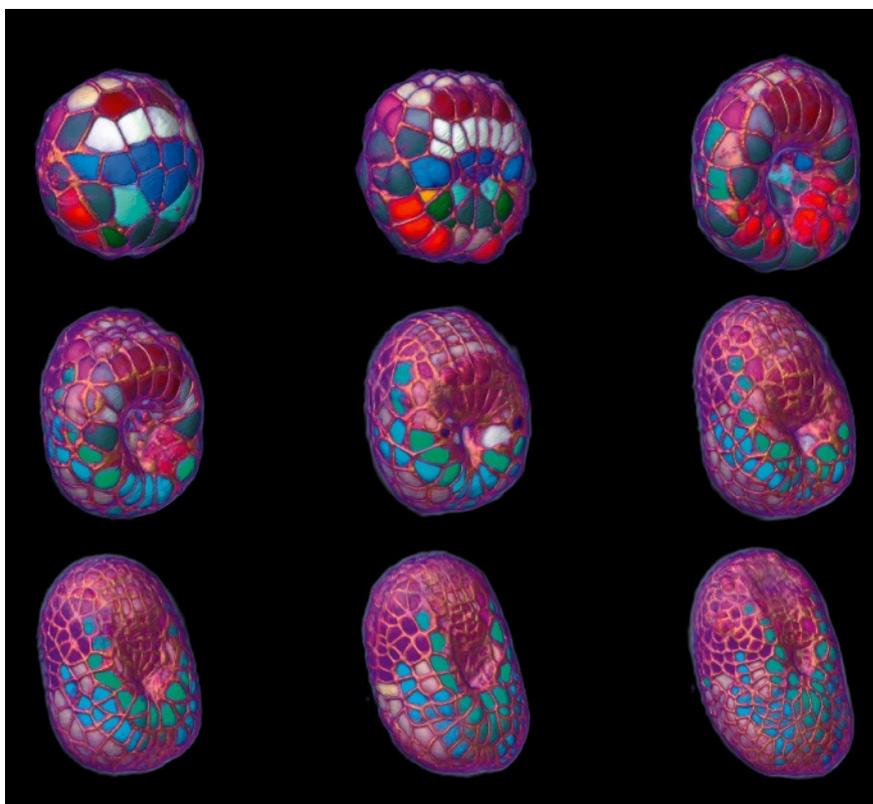
P.24 *Homo sapiens informaticus*

P.26 Questions de confiance

### BIOLOGIE

# POURQUOI L'EMBRYON SE DÉVELOPPE TOUJOURS DE LA MÊME FAÇON

Durant le développement de l'ascidie *Phallusia mammillata*, chaque cellule embryonnaire est repérable et occupe la même position d'un embryon à l'autre (ici le développement d'un embryon observé au microscope, superposé à sa reconstruction numérique, où chaque couleur indique le tissu que les cellules formeront. Les cellules rouges, par exemple, deviendront les muscles de la queue).



**Chez les ascidies, des animaux marins proches des vertébrés, le développement est si reproductible qu'il est possible de reconnaître chaque cellule d'un embryon à l'autre. Leur secret ? Les contacts entre cellules...**

**C**hez tous les animaux, la vie débute par un ballet finement orchestré en trois dimensions: durant les tout premiers stades du développement, une cellule-œuf fécondée subit des divisions successives selon des lois géométriques particulièrement reproductibles d'un individu à l'autre. Cette reproductibilité se poursuit ensuite à l'échelle des tissus, même si au sein d'un même tissu le comportement des cellules varie d'un embryon à l'autre. Depuis longtemps, cette constance fascine

les biologistes du développement, qui tentent de comprendre quels mécanismes la maintiennent malgré la grande diversité des génomes. Léo Guignard et Patrick Lemaire, du centre de recherche en biologie cellulaire de Montpellier (université de Montpellier, CNRS), et leurs collègues ont apporté une réponse en suivant pas à pas l'embryogenèse d'un petit animal marin, l'ascidie *Phallusia mammillata*.

Cet organisme qui, à l'âge adulte, évoque une outre enracinée dans le sol marin, commence sa vie sous une forme larvaire qui ressemble à un têtard. Les

ascidies intéressent les biologistes du développement pour deux raisons. D'une part, elles appartiennent au groupe des tuniciers, l'embranchement le plus proche des vertébrés. D'autre part, leur embryogenèse est particulièrement reproductible: il est possible de reconnaître chaque cellule jusqu'à un stade du développement bien plus avancé que chez les autres animaux. Aussi les ascidies constituent-elles une piste intéressante pour comprendre comment les embryons contrôlent la reproductibilité du développement à l'échelle cellulaire. D'autant que la géométrie de leurs embryons a peu changé depuis l'émergence du groupe, il y a environ 400 millions d'années, malgré une importante diversification génétique.

Léo Guignard et ses collègues se sont intéressés à la communication entre

cellules, qui joue un rôle clé dans l'embryogenèse à toutes les échelles. Notamment, chez les vertébrés, on sait que les cellules communiquent à distance en libérant des facteurs morphogènes – diverses molécules dont le gradient de concentration spécifie à quels endroits de l'organisme les cellules vont se spécialiser en tel ou tel tissu. Chez les ascidies, des signaux extérieurs aux cellules influent aussi sur leur induction. Cependant, les contacts entre cellules semblent jouer un rôle primordial. En 2006 en effet, l'équipe de Patrick Lemaire a montré, à l'aide d'un modèle numérique 3D d'embryons d'ascidies, que la taille de la surface de contact entre les cellules est déterminante pour leur induction.

Pour comprendre les mécanismes en jeu, Léo Guignard et ses collègues ont enregistré toutes les deux minutes le développement de dix embryons de *Phallusia mammillata* à l'aide d'un microscope de haute résolution à « nappe de lumière », puis, à l'aide d'un logiciel, ont suivi chaque cellule, sa géométrie et les contacts qu'elle établissait avec ses voisines. Ils ont ainsi non seulement confirmé la reproductibilité du développement à l'échelle cellulaire, mais aussi montré que même les surfaces de contact entre cellules voisines sont reproductibles d'un embryon à l'autre.

Pour préciser le rôle des contacts dans l'embryogenèse, l'équipe a ensuite combiné, par modélisation mathématique, les informations géométriques obtenues avec le profil d'expression des principaux gènes impliqués dans la signalisation entre cellules. Ils en ont déduit que les signaux échangés par les cellules étaient de très courte portée et compatibles avec des signaux de contact.

La corrélation entre géométrie et signaux de contact était tellement forte que les signaux de contact entre cellules pourraient suffire pour construire un embryon d'ascidie. La portée de la signalisation déterminerait l'échelle à laquelle la reproductibilité est observée : quand les signaux de contact sont majoritaires, l'embryon est reproductible à l'échelle cellulaire, puis quand les signaux à plus longue distance prennent le dessus, l'échelle de la reproductibilité devient tissulaire. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

L. Guignard et al., *Science*, vol. 369, article eaar5663, 2020

## BPA : des substituts tout aussi problématiques

Une équipe de l'Institut de recherche en santé, environnement et travail (Irset), à Rennes, a mené une vaste étude sur la nocivité des substituts du bisphénol A (BPA) chez le poisson-zèbre. Ces composés se sont révélés être, comme le bisphénol A, des perturbateurs endocriniens. Pascal Coumailleau, l'un des quatre auteurs de ces travaux, nous commente leurs résultats.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

PASCAL COUMAILLEAU  
enseignant-chercheur  
à l'université Rennes-1  
et à l'Irset

### Qu'est-ce que le bisphénol A ?

Il s'agit d'un composé organique de la famille des molécules aromatiques. Il se caractérise par la présence de deux groupes phénol. Depuis les années 1960, l'industrie du plastique l'utilise en grandes quantités sous la forme de polycarbonate, car il présente de nombreuses qualités : transparent, léger et résistant aux chocs mécaniques. Il sert à la fabrication des biberons, des bouteilles en plastique, des films à l'intérieur des canettes, des boîtes de conserve, etc. On le retrouve aussi dans les CD ou les films thermosensibles des tickets de caisse.

### Quel problème ce composé pose-t-il ?

Sa structure moléculaire est assez proche de celle des œstrogènes, des hormones sexuelles. À cause de cette similarité, le bisphénol A se fixe sur le récepteur des œstrogènes et perturbe cette voie de signalisation hormonale. C'est donc un « perturbateur endocrinien ». Or les hormones agissent même en très faibles quantités ; il suffit donc d'une concentration restreinte de bisphénol A pour observer des effets.

D'après beaucoup d'études, cette molécule semble associée à de nombreuses maladies : diabète, maladies cardiovasculaires, problèmes hépatiques ou thyroïdiens, cancer du sein, etc. Ses effets de perturbateur endocrinien seraient particulièrement sensibles lors du développement embryonnaire et fœtal, avec des conséquences sur le développement des organes sexuels mâles et femelles, du cerveau et sur le comportement reproducteur.

Depuis 2015, son utilisation est interdite dans tous les contenants alimentaires en France. En 2017, l'Agence européenne des produits chimiques a ajouté le bisphénol A dans la liste des « substances extrêmement préoccupantes ».

### Est-il possible de le remplacer ?

Pour l'heure, les substituts proposés sont tous des dérivés de la famille des bisphénols. Ils ont été beaucoup moins étudiés que le bisphénol A. Quand nous avons lancé notre étude sur le poisson-zèbre il y a trois ans, il y avait quelques indices d'effets perturbateurs chez ces autres bisphénols. Notre objectif a été d'avoir une vision globale de la situation, de comparer le bisphénol A à quatre substituts parmi les plus utilisés, les bisphénols S, F, AF, et AP. Et d'étudier l'impact sur le développement du poisson-zèbre.

### Avec quels résultats ?

Parmi les nombreux paramètres que nous avons étudiés, nous avons regardé le moment précis d'éclosion des larves des poissons-zèbres qui est un indicateur du développement global de l'animal. On sait que certaines substances accélèrent ou ralentissent le développement et décalent l'éclosion. Avec tous les bisphénols étudiés, nous avons mesuré une accélération du développement, ce qui n'est pas sans conséquence à long terme.

### Vous avez aussi examiné la production d'aromatase B ; de quoi s'agit-il ?

Cette enzyme assure la conversion de la testostérone en œstradiol (hormone de la famille des œstrogènes). Elle a un rôle essentiel pour maintenir l'équilibre entre ces deux hormones dans l'organisme, notamment le cerveau. En outre, chez le poisson, le gène qui code cette protéine est une cible d'activation des œstrogènes. Nous avons montré que les bisphénols S, F et AF (surtout ce dernier) ont une activité œstrogénique très nette car ils augmentent de façon significative la synthèse de l'aromatase B. Nous avons aussi observé qu'un de ces substituts modifie le comportement de nage des larves de poisson-zèbre. Les effets observés indiquent qu'il est impératif de se tourner vers d'autres molécules de remplacement. Reste à trouver lesquelles... ■

P. Coumailleau et al., *Journal of Neuroendocrinology*, en ligne le 21 juin 2020

## GÉOSCIENCES

# LA SOURCE DU POINT CHAUD DE HAWAII SE DÉVOILE

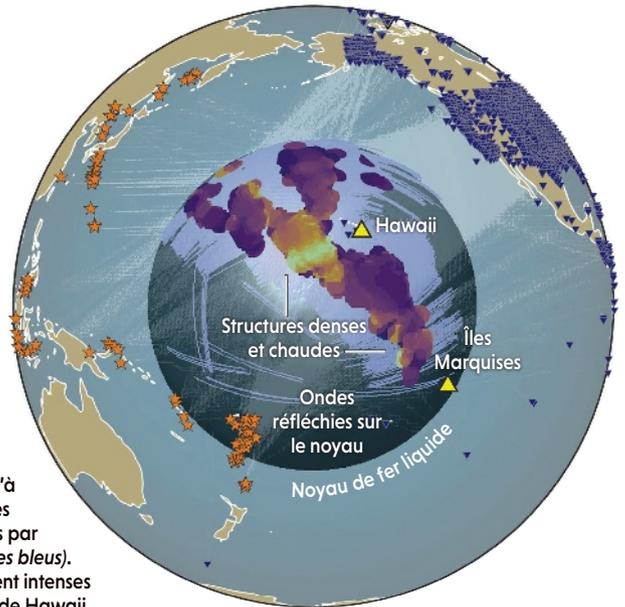
En analysant les échos des ondes sismiques, des chercheurs ont affiné la cartographie des structures situées à l'interface du manteau et du noyau terrestres.

**A**u contact du noyau de fer liquide, la base du manteau terrestre, composé de roches silicatées, est d'une grande complexité structurale, qui lui vaut le nom de couche « anormale » D". De la même façon que les chauves-souris utilisent l'écholocation par ultrasons pour explorer leur environnement, Doyeon Kim, de l'université du Maryland, aux États-Unis, et des collègues géologues et astrophysiciens ont analysé les échos des ondes sismiques pour cartographier avec précision cette région sous l'océan Pacifique.

Depuis plus de cent ans, les géologues utilisent les ondes sismiques pour sonder l'intérieur de la Terre. Ces ondes parcourent des milliers de kilomètres à des vitesses qui varient selon les matériaux traversés. En collectant ces signaux, les chercheurs en déduisent la structure interne de la planète. Au sein de la couche D", ils ont notamment découvert des « superpanaches », des assemblages gigantesques qui résultent peut-être de l'accumulation d'anciennes plaques océaniques enfouies vers l'intérieur du manteau à la suite de leur subduction. Sur les bords de ces superpanaches, les chercheurs ont identifié d'autres structures plus petites, les ULVZ (*ultra low velocity zones*). Elles pourraient correspondre à des régions où les anciennes plaques fondent. Ces zones sont d'ailleurs corrélées à des points chauds (où de la roche mantellique très chaude remonte jusqu'à la surface et donne naissance à un volcanisme important), comme celui qui est à l'origine de l'archipel de Hawaii.

Doyeon Kim et ses collègues ont récemment mis au point une nouvelle technique pour cartographier les détails de la couche D". Le principe est simple : comme c'est le cas pour les ondes sonores, lorsqu'une onde sismique rencontre un obstacle ou une région de composition différente, elle est en partie réfléchi. Cela crée une onde secondaire plus faible, qui arrive avec un peu de retard par rapport au signal qui s'est propagé sans avoir subi de déflexion. Ces échos sismiques sont riches en information, mais leur étude était difficile jusqu'à présent, car ces faibles signaux sont souvent noyés dans le bruit de fond. Les analyses étaient restreintes

L'utilisation des échos des ondes sismiques a permis de cartographier les structures existantes à la base du manteau terrestre. Les ondes des séismes (étoiles orange) se sont propagées jusqu'à la surface du noyau et les échos ont été enregistrés par des sismomètres (triangles bleus). Les échos particulièrement intenses au pied du point chaud de Hawaii et des îles Marquises (triangles jaunes) indiquent la présence de structures de grande taille.



à des régions de très petite taille, pour en permettre l'interprétation.

Doyeon Kim et ses collègues ont amélioré la situation en développant une nouvelle méthode qui leur a permis d'analyser des échos sous tout le bassin Pacifique. Les chercheurs ont utilisé un nouvel algorithme nommé « le Séquenceur », initialement élaboré dans un contexte astrophysique. « L'algorithme a été conçu pour détecter par lui-même des tendances ou des motifs dans des données sans avoir besoin d'indiquer un modèle *a priori* », explique Brice Ménard, astrophysicien à l'université Johns-Hopkins et créateur de l'algorithme. Le programme a ainsi extrait les échos du bruit de fond. Avec ces données, les géologues ont montré que la couche D" possède encore plus de structures qu'on ne l'imaginait. Ils ont visualisé la base du panache qui alimente l'archipel de Hawaii et ont découvert une structure similaire sous les îles Marquises, l'un des cinq archipels de la Polynésie française. ■

S. B.

D. Kim *et al.*, *Science*, vol. 368, pp. 1223-1228, 2020

## EN BREF

### UNE IA QUI A L'ŒIL SUR LES OISEAUX

Pour étudier des groupes d'espèces sauvages, il est utile de pouvoir reconnaître chaque individu. Il n'est pas toujours aisé de distinguer à l'œil le pelage ou le plumage de deux animaux. André Ferreira, de l'université Paul-Valéry, à Montpellier, et ses collègues ont conçu un algorithme d'intelligence artificielle reposant sur l'apprentissage profond qui est capable de distinguer les motifs sur les plumes des oiseaux de façon à reconnaître chaque individu.

*Methods Ecol. Evol.*,  
26 juillet 2020

### UNE CARTE COSMIQUE ÉTENDUE

Les astrophysiciens du programme SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) viennent de réaliser la plus vaste carte 3D de l'Univers. Celle-ci couvre les 11 derniers milliards d'années d'expansion cosmique. Jusqu'à présent, on n'avait que la moitié. Or, justement, il y a environ 6 milliards d'années, l'expansion a accéléré sous l'impulsion de l'« énergie sombre (ou noire) ». Cette nouvelle carte permettra de poser des contraintes sur ce moteur cosmique de nature inconnue.

Communiqué du SDSS,  
19 juillet 2020

### EBOLA : SÉQUELLES À LONG TERME

Entre 2013 et 2016, en Afrique de l'Ouest, le virus Ebola a contaminé 28 000 personnes, dont 11 000 sont mortes. Dans le cadre de l'étude des séquelles chez d'anciens malades, l'équipe d'Yves Lévy, de l'Inserm, a analysé des prélèvements sanguins chez 35 individus. Bien que physiquement guéris, ces derniers présentent deux ans après des concentrations anormalement élevées de marqueurs immunitaires et inflammatoires (qui témoignent de la persistance d'une inflammation).

*Nature Comm.*, 24 juillet 2020

## PALÉONTOLOGIE

# DINOSAURES : DES ŒUFS D'ABORD MOUS

Les dinosaures pondaient-ils des œufs durs ou mous? Les deux, suggère l'équipe de Mark Norell, du Muséum américain d'histoire naturelle, à New York!

Il y a 310 millions d'années, l'apparition de l'œuf amniotique – un embryon protégé par une membrane – a rendu les reptiles capables de pondre hors de l'eau. Puis celle d'œufs à coquille calcaire les a aidés à coloniser les continents. Comme les crocodiliens et oiseaux modernes, proches parents des dinosaures, pondent des œufs à coquilles dures, les paléontologues ont d'abord supposé qu'il en était de même pour les dinosaures. Toutefois, la diversité des microstructures des coquilles d'œufs fossiles des sauropodes, hadrosaures et autres théropodes contredit l'idée d'une origine commune des œufs à protection calcaire.

Pour avancer, l'équipe de Mark Norell a étudié les œufs fossiles non calcaires de *Mussaurus*, un dinosaure datant du Norien (227 à 208 millions d'années), et de *Protoceratops*, un dinosaure du Campanien (84 à 72 millions d'années). L'examen minéralogique, organochimique et structural indique que ces œufs d'époques très différentes étaient mous. Afin d'interpréter ces observations, les chercheurs ont fait



La couvée de *Protoceratops* étudiée a été découverte dans le désert de Gobi, en Mongolie. Elle contient des œufs et des embryons aux squelettes presque complets.

fonctionner un modèle d'évolution des structures d'œufs. Les incohérences entre les microstructures des œufs dinosauriens seraient dues à l'apparition, à trois reprises au moins au cours de l'évolution de ce groupe de reptiles, d'œufs à coquille, à partir d'un type différent d'œuf ancestral mou dans chaque cas. Et la rareté des œufs fossiles de dinosaures dans les roches anciennes s'expliquerait par le fait que les premiers dinosaures pondaient plutôt des œufs mous. ■

FRANÇOIS SAVATIER

M. A. Norell *et al.*, *Nature*,  
vol. 583, pp. 406-410, 2020

## BIOPHYSIQUE

# DES POISSONS SUPERNOIRS

Dans les océans, à plus de 200 mètres de profondeur, les seules sources de lumière sont biologiques et utilisées notamment pour traquer ou attirer des proies. Mais certains poissons restent bien cachés grâce à une peau très noire dont le coefficient de réflexion (qui atteint 0,044% pour une espèce) rivalise avec celui des matériaux artificiels. Alexander Davis, de l'université Duke, aux États-Unis, et ses collègues ont étudié plusieurs espèces dotées de ce camouflage supernoir.

Ils ont mis en évidence sous l'épiderme une couche de mélanosomes (des organites contenant la mélanine, un pigment), dense, continue et épaisse de plusieurs micromètres. Grâce à un modèle numérique, l'équipe a étudié le coefficient de réflexion de cette structure et a conclu que les couches de mélanosomes dans



Ce poisson des abysses, de la famille des dragons à écailles (*Stomiidae*), a une peau très noire qui réfléchit moins de 0,5% de la lumière.

la peau des poissons supernoirs avaient des caractéristiques optimales pour maximiser le pouvoir d'absorption de la lumière. La simplicité de cet assemblage laisse entrevoir des méthodes de production de revêtements supernoirs aisées à mettre en œuvre. ■

S. B.

A. L. Davis *et al.*, *Current Biology*,  
en ligne le 16 juillet 2020

## ASTROPHYSIQUE

# DES FEUX DE CAMP À LA SURFACE DU SOLEIL

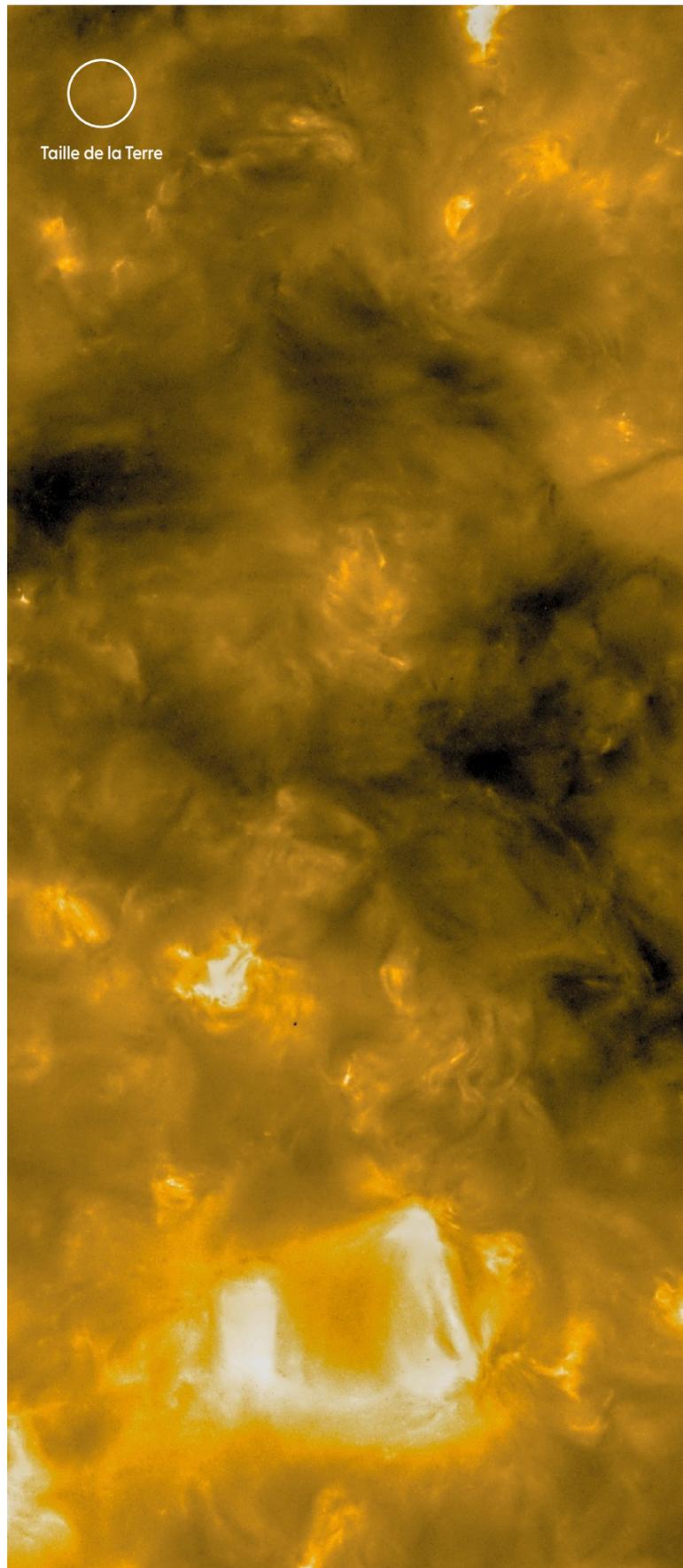
**À** mi-chemin de la distance qui sépare la Terre du Soleil, la sonde *Solar Orbiter* a pris cette image en ultraviolet de la surface du Soleil – la photographie la plus proche jamais réalisée de la surface de l'astre brûlant. L'analyse du cliché montre que la surface bruisse d'une activité relativement discrète; elle est parsemée d'un millier de «feux de camp» (*l'un d'eux est indiqué par une flèche*). Ceux-ci ressemblent aux éruptions solaires visibles depuis la Terre, mais dans des versions miniatures, des millions voire des milliards de fois plus petites (*l'échelle est donnée en haut à gauche par la taille de la Terre*). Cette différence d'échelle amène à se demander si le mécanisme sous-jacent est bien le même.

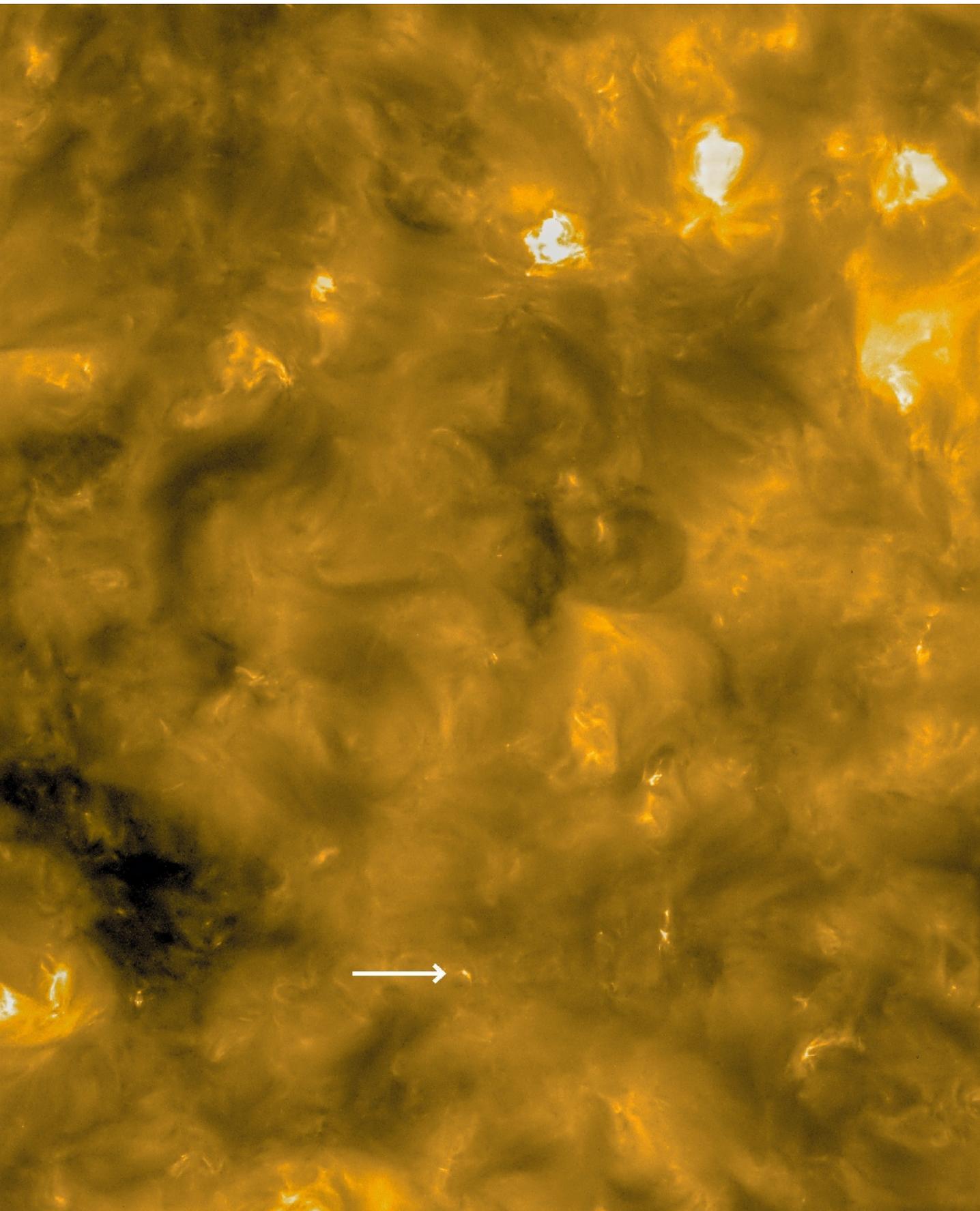
L'une des grandes énigmes du Soleil porte sur sa couronne, son atmosphère dont la température dépasse le million de degrés quand celle de sa surface n'est que de 5 500 °C. Aucun modèle n'explique de façon complète et satisfaisante comment l'atmosphère de l'étoile peut être si chaude comparée à la surface de l'astre. Une partie de la réponse viendrait des reconnections du champ magnétique qui seraient à l'origine des éruptions solaires. Lorsque les lignes du champ magnétique solaire se réorganisent, se reconnectent, elles libèrent brusquement vers la couronne de grandes quantités d'énergie qu'elles avaient accumulées.

Il y a trente ans, Eugene Parker, de l'université de Chicago, avait suggéré que des nanoéruptions pouvaient aussi chauffer la couronne. Ces événements de reconnexion magnétique porteraient très peu d'énergie chacun, mais se produiraient partout et tout le temps. Les feux de camp sont-ils ces fameuses nanoéruptions? La réponse viendra peut-être des observations de la sonde *Solar Orbiter* qui ne font que commencer. ■

S. B.

Communiqué de l'ESA:  
[https://bit.ly/PLS515\\_ESA](https://bit.ly/PLS515_ESA)





© Solar Orbiter/EUI Team/ESA & NASA; CSL, IAS, MPS, PMOD/WRC, ROB, UCL/MSSL

## NEUROSCIENCES

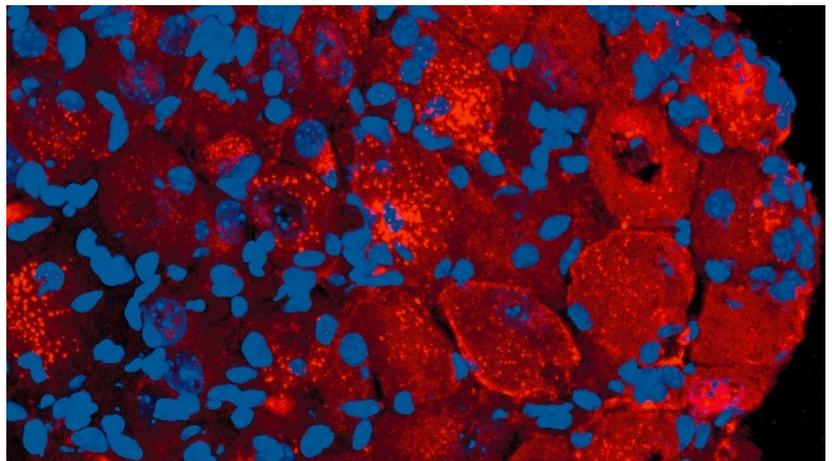
# DOULEURS CHRONIQUES : DE NOUVELLES PISTES DE TRAITEMENTS

Des chercheurs français ont découvert deux nouvelles cibles cellulaires qui, quand elles sont bloquées, diminuent les douleurs neuropathiques chez le rat.

Les douleurs neuropathiques sont dues à la lésion ou au dysfonctionnement de neurones sensoriels, provoqués par une blessure, une opération chirurgicale, une maladie (infection virale, diabète...) ou une substance toxique (par exemple, certains anticancéreux). Mais alors que la cause primaire de la douleur est soignée, la sensation douloureuse persiste parfois de longs mois, voire des années, sans que l'on comprenne vraiment pourquoi et souvent sans que les traitements actuels l'atténuent : 7 à 10% des Français en souffrent, sachant que 20 à 30% de ces patients développent aussi des difficultés cognitives, des troubles de l'humeur et du sommeil, ainsi que du stress, de l'anxiété ou des symptômes dépressifs. Mais Pierre-Yves Martin, du laboratoire Neuro-Dol (université Clermont-Auvergne et Inserm), et ses collègues viennent peut-être de découvrir deux pistes thérapeutiques.

Ils ont travaillé sur des rats auxquels ils ont soit ligaturé un nerf rachidien, soit injecté de l'oxaliplatine, un anticancéreux qui provoque des douleurs neuropathiques périphériques. Plusieurs jours après, quand on les touchait ou leur appliquait du chaud ou du froid sur la peau, tous les rongeurs présentaient une allodynie – des sensations douloureuses provoquées par un stimulus qui normalement ne fait pas de mal –, ainsi que des troubles cognitifs.

Or ce genre de douleur fait intervenir dans la moelle épinière des « neurones nocicepteurs », certains transmettant les signaux douloureux et d'autres les modulant, notamment *via* la sérotonine, un neurotransmetteur aux multiples fonctions dans la régulation de l'appétit, du sommeil, de l'humeur et de la douleur. D'ailleurs, on prescrit souvent certains antidépresseurs jouant directement sur la transmission de la sérotonine pour soulager les douleurs chroniques, mais leur efficacité est faible, avec, au mieux, un patient traité sur trois qui ressent une amélioration; un fait qui s'expliquerait notamment par la multiplicité des récepteurs à la sérotonine et de leurs effets, les antidépresseurs ne ciblant pas forcément ceux qui régulent la douleur.



Ganglion rachidien observé en microscopie à fluorescence quelques jours après une lésion du nerf sciatique (en rouge, les neurones, en bleu, les noyaux de cellules neuronales et non neuronales)

C'est pourquoi les chercheurs se sont intéressés aux récepteurs de la sérotonine notés 5-HT<sub>6</sub>, très abondants dans les neurones nocicepteurs de la moelle épinière. Ils ont ainsi mis en évidence une activité spontanée élevée de ces récepteurs uniquement chez les rats souffrant d'allodynie tactile ou thermique. Puis ils ont administré à ces derniers un « agoniste inverse » des récepteurs 5-HT<sub>6</sub>, le PZ-1388, qui bloque justement leur activité spontanée. Les rats ne présentaient alors plus d'allodynies ni de troubles cognitifs associés pendant plusieurs heures.

De plus, Pierre-Yves Martin et ses collègues ont révélé que le mécanisme d'action de ces récepteurs passe par l'activation intraneuronale d'une autre molécule, mTOR, et de sa voie de signalisation. En inhibant cette dernière avec de la rapamycine (une molécule utilisée comme immunosuppresseur), ils ont montré que les rats ne souffraient plus non plus. De même quand ils perturbaient l'interaction des récepteurs 5-HT<sub>6</sub> avec mTOR, grâce à une autre substance jouant le rôle de « leurre ». Reste à prouver que ces deux cibles sont aussi pertinentes chez l'humain. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

P.-Y. Martin *et al.*, *Progress in Neurobiology*, vol. 193, article 101 846, 2020

## EN BREF

### LA FORMATION DU SMOG EXPLIQUÉE

Les mégapoles sont souvent accablées en hiver par des épisodes de smog, une brume grisâtre, épaisse et néfaste pour la santé. Si le mécanisme général de formation du smog est bien compris – la condensation de l'humidité de l'air sur des particules en suspension –, on ne comprenait pas comment ces particules naissent dans les conditions urbaines polluées. Mingyi Wang, de l'université Carnegie-Mellon, à Pittsburgh et ses collègues ont utilisé l'expérience Cloud, du Cern, près de Genève, pour préciser ce phénomène. Ces chercheurs ont mis en exergue le rôle des réactions entre vapeurs d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), qui forment des particules de nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ).

Nature, 13 mai 2020

## PHYSIQUE DES PARTICULES

### XENON1T: UN SIGNAL INATTENDU

Dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie, l'équipe de l'expérience *Xenon1T* traque depuis 2016 des indices de l'existence de la fameuse matière noire, qui représenterait environ 25% du contenu de l'Univers. Le détecteur est conçu pour repérer la collision d'une particule hypothétique nommée *wimp* (acronyme anglais pour « particule massive interagissant faiblement ») avec un des atomes de xénon liquide contenu dans la cuve de l'expérience. Or les physiciens ont mis en évidence un signal inattendu. Pour des signaux d'énergie comprise entre 1 et 7 kiloélectronvolts, ils avaient estimé que le bruit de fond (la radioactivité naturelle ambiante) devait produire 232 signaux en un an, mais ils en ont mesuré 285. Comment interpréter cet excès? S'il s'agit d'une nouvelle particule, elle est trop légère pour correspondre au *wimp*, mais pourrait être un axion (un autre candidat pour la matière noire). La prudence reste de mise, car d'autres explications sont possibles:



© Collaboration Xenon

Vue de l'intérieur du détecteur.

un effet exotique lié aux neutrinos qui traversent la cuve en permanence ou encore un bruit de fond mal maîtrisé, comme la présence de tritium (un isotope de l'hydrogène) dans la cuve. Le successeur de *Xenon1T*, qui entrera en fonction dès l'année prochaine, permettra probablement d'y voir plus clair. ■

S. B.

E. Aprile et al., prépublication *arXiv*, 17 juin 2020  
<https://arxiv.org/abs/2006.09721>

**À L'AUDITORIUM DE LA GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION**

Jardin des Plantes  
 36 rue Geoffroy St Hilaire - Paris 5<sup>e</sup>

Entrée libre et gratuite dans la limite des places disponibles

Détails sur [jardindesplantesdeparis.fr](http://jardindesplantesdeparis.fr)

POUR LA SCIENCE

### EN LIEN AVEC L'EXPOSITION PIERRES PRÉCIEUSES

#### CINÉ-CLUB Samedi 3 octobre 15h

#### Voyage au centre de la Terre (1959, 132 min.), de Henry Levin

Le professeur Oliver Lindenbrook, convaincu que l'explorateur Arne Saknussemm, porté disparu, est parvenu au centre de la Terre, quitte Edimbourg avec ses camarades. Ils entreprennent un extraordinaire périple et sont poursuivis par le Comte Saknussemm qui souhaite bénéficier des retombées de la découverte de son ancêtre disparu. Avec le témoignage de Bernard Tourte, spéléologue.

#### RENCONTRES

#### Imaginaires des pierres - Histoires, croyances, symboles

#### Lundi 5 octobre de 19h à 20h

Amulettes, pierres maléfiques, symboles précieux... Comment expliquer la fascination pour les pierres précieuses ? Un rendez-vous à la croisée de l'histoire de l'art, de la littérature médiévale et de l'anthropologie.

Table-ronde animée par Marie-Odile Monchicourt, journaliste

Avec : Alain Epelboin, médecin-anthropologue, Muséum national d'Histoire naturelle. Inezita Gay-Eckel, historienne de l'art, professeure à L'École des Arts Joailliers. Valérie Gontero-Lauze, maître de conférences de langue et littérature du Moyen Âge, Département de Lettres Modernes (CIELAM).

#### Parures, le corps sublimé ?

#### Lundi 12 octobre de 19h à 20h

Plus ancienne forme d'art au monde, traversant le temps et l'espace, les parures ornent, transforment et transcendent les corps. Attributs des dieux, des rois, des esprits, mais aussi des hommes, elles ont joué, dès les premiers temps, un rôle social, culturel et identitaire, explorant un aspect fondamental de l'être humain.

Table-ronde animée par Capucine Juncker, journaliste

Avec : Emilie Bérard, Responsable Collection Patrimoine, Van Cleef & Arpels, Thomas Golsenne, historien de l'art moderne et culture visuelle, Université de Lille, Roland Nespoulet, préhistorien, Muséum national d'Histoire naturelle.

Sous réserve des conditions sanitaires en vigueur à cette période.



CHIMIE

## ÉNERGIE SOLAIRE TOUT-EN-UN

Comment combiner une cellule photovoltaïque et une batterie pour stocker l'électricité avec un bon rendement? Weijie Li, de l'université du Wisconsin, aux États-Unis, et ses collègues ont mis au point un dispositif monobloc comportant une cellule photovoltaïque tandem « perovskite-silicium » couplée à une batterie à flux.

Constituée d'une superposition d'une cellule classique au silicium et d'une cellule composée d'un hybride organique-inorganique (de type iodure d'ammonium ou bromure de plomb), de structure cristalline nommée « perovskite », la cellule photovoltaïque tandem absorbe une gamme plus large de rayonnement solaire qu'une cellule commerciale au silicium: elle atteint une efficacité de 20% contre 10 à 15% pour les autres.

Le système de stockage est une batterie à flux. Dans un accumulateur classique, l'énergie est stockée sous forme d'électrodes métalliques (en lithium, ou en plomb par exemple) mises en contact *via* un milieu contenant des électrolytes inertes. Dans les batteries à flux, l'énergie est stockée sous forme d'électrolytes chimiquement actifs et séparés par une membrane poreuse. L'échange d'ions au niveau de la membrane produit de l'électricité. Dans le

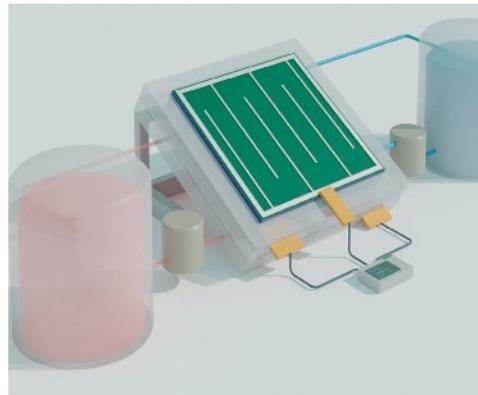


Schéma de principe du dispositif avec la cellule solaire tandem (au centre) et les deux électrolytes (en bleu et en rose).

dispositif de l'équipe de Weijie Li, ces électrolytes sont régénérés directement au contact de la cellule photovoltaïque (où seule une couche d'or de 0,1 micromètre d'épaisseur empêche la corrosion de la cellule). Aucune perte d'énergie liée au stockage de celle-ci dans la batterie à flux n'a été constatée. Plus coûteux que les grandes installations solaires intermittentes reliées au réseau électrique, ce dispositif répondrait aux besoins d'utilisations individuelles dans des zones isolées. ■

MARTIN TIANO

Weijie Li et al., *Nature Materials*, en ligne le 13 juillet 2020

ENVIRONNEMENT

## DES MICROPLASTIQUES PARTOUT

Depuis une quinzaine d'années, les chercheurs étudient la dispersion et l'impact des microplastiques (des particules de plastique de moins de cinq millimètres de diamètre) dans les océans et, plus généralement, dans les milieux aquatiques. Le constat est que ces polluants se retrouvent dans des zones aussi isolées que l'océan Antarctique. Mais qu'en est-il sur les continents? Le phénomène de pollution semble être général et n'épargne pas les régions reculées. En 2019, Steve et Deonie Allen, du Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, à Toulouse, ont montré qu'on retrouve des microplastiques dans des zones reculées des Pyrénées. Plus récemment, Janice Brahney, à l'université de l'Utah, et ses collègues ont étudié les données provenant de onze zones protégées et de parcs



Microplastiques prélevés dans des parcs protégés des États-Unis.

nationaux de l'Ouest américain (couvrant près de 500 kilomètres carrés). Au total, ces chercheurs estiment que près de 1000 tonnes de plastiques s'accumulent par an sur la zone qu'ils ont étudiée. ■

JULES COIGNARD

J. Brahney et al., *Science*, vol. 368, pp.1257-1260, 2020

EN BREF

### LE SILENCE SISMIQUE DU CONFINEMENT

Les mesures de confinement pour lutter contre la propagation du Covid-19 ont eu une conséquence surprenante. En analysant les données de plus de 300 stations sismiques dans le monde, Thomas Lecocq, de l'observatoire royal de Belgique, et ses collègues ont constaté que le bruit sismique dû à l'activité humaine avait diminué de 50% entre janvier et juin 2020. Ils ont même pu suivre la « vague » de confinement en Chine, puis en Italie et sur le reste de la planète.

*Science*, 24 juillet 2020

### NANOTHERMOMÈTRE CHIMIQUE

Avec la miniaturisation des composants électroniques à des échelles nanométriques se pose la question de comment mesurer leur échauffement. Karl Ridier, du Laboratoire de chimie de coordination, à Toulouse, et ses collègues ont conçu des molécules dont les propriétés optiques varient avec la température. Avantage d'un revêtement les utilisant : il est particulièrement stable, même après plus de 10 millions de cycles thermiques, et résiste à des températures de 230 °C.

*Nature Comm.*, 17 juillet 2020

### PAS D'EFFET PANDA !

Dès les années 1960, la Chine a lancé un vaste programme pour protéger le panda en créant de grandes réserves. Depuis, le panda est passé du statut d'« espèce en danger » à « espèce vulnérable ». Mais ce succès a-t-il permis de protéger d'autres espèces par « effet parapluie » ? Non : Sheng Li, de l'université de Beijing, et ses collègues ont constaté que le léopard, le léopard des neiges, le loup et le dhole ont disparu en grande partie des réserves, à cause du braconnage, de la déforestation et des maladies.

*Nat. Ecol. Evol.*, 4 août 2020

## LA FUITE RAPIDE DE TITAN

**À** cause des forces de marée qui provoquent des frottements et ralentissent la rotation de la Terre, la Lune s'éloigne progressivement de sa planète hôte à la vitesse de 3,8 centimètres par an. On pensait que ce processus n'était pas aussi efficace pour les lunes de Saturne, car cette dernière est essentiellement gazeuse. Mais Valéry Lainey, de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, à Paris, et ses collègues viennent de montrer que Titan prend ses distances avec Saturne à une vitesse de 11 centimètres par an, soit 100 fois plus vite qu'on ne le pensait. Or en 2016, Jim Fuller, de Caltech, aux États-Unis, et ses collègues ont proposé un mécanisme reposant sur des résonances gravitationnelles, qui expliquerait une fuite aussi rapide. ■

S. B.

V. Lainey *et al.*, *Nature Astronomy*, en ligne le 8 juin 2020

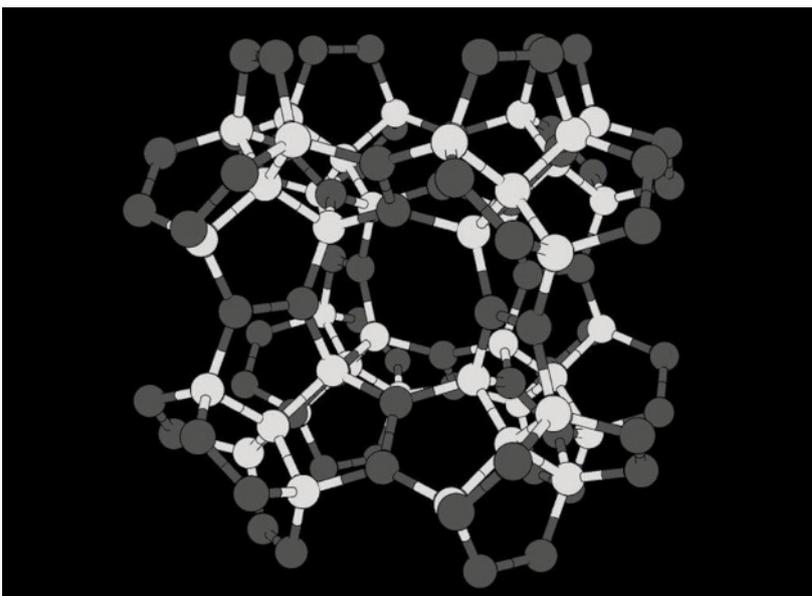
## INCERTITUDES NUAGEUSES

**E**n vue du prochain rapport du Giec en 2022, les climatologues ont développé des dizaines de modèles qui intègrent l'état de l'art du domaine. Pour les comparer, ils regardent un indicateur: la hausse de température quand on double la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone par rapport à l'ère préindustrielle. Dans la précédente génération de simulations, les modèles prévoient un réchauffement compris entre 2,1 °C et 4,7 °C. Il est maintenant compris entre 1,8 °C et 5,6 °C. Gerald Meehl, du centre américain pour la recherche atmosphérique, à Boulder, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que cette dispersion plus grande des valeurs est surtout liée aux nuages, dont l'effet sur le climat est complexe et pas encore totalement compris. Selon les choix faits dans les modèles, les résultats diffèrent. Des campagnes d'observation devraient préciser la dynamique des nuages et aider à faire converger les modèles. ■

S. B.

G. A. Meehl *et al.*, *Science Advances*, vol. 6(26), article eaba1981, 2020

## LE PENTADIAMANT, MIEUX QUE LE DIAMANT



Le pentadiamant est formé uniquement d'atomes de carbone qui constituent des cycles pentagonaux.

**D**iamant, graphène, fullerènes, nanotubes... tous ces matériaux appartiennent à la grande famille du carbone. On parle de formes allotropiques du carbone car elles sont toutes composées de l'élément carbone, mais suivant des structures différentes. Dans le diamant, les atomes se lient à quatre autres pour former un réseau tridimensionnel très résistant aux déformations. Pour le graphène, le réseau est bidimensionnel et les atomes de carbone ne sont reliés qu'à trois voisins. Des centaines de formes allotropiques ont été imaginées. En particulier, les structures à cycles pentagonaux intéressent les chercheurs car elles présentent des propriétés physiques inhabituelles.

Yasumaru Fujii et ses collègues, de l'université de Tsukuba, au Japon, ont étudié théoriquement les propriétés d'un allotrope du carbone métastable qui peut être obtenu par copolymérisation de deux monomères contenant des cycles pentagonaux. Tous les atomes de carbone se retrouvent dans des cycles connectés à trois ou quatre autres atomes. En utilisant la théorie de la «fonctionnelle de la densité», qui permet d'étudier la structure électronique du matériau, les chercheurs ont estimé les propriétés de ce qu'ils nomment un pentadiamant. Ils ont montré que sa rigidité serait supérieure à celle du diamant, et qu'il se comporterait comme un semi-conducteur.

Les monomères qui composent le pentadiamant sont disposés selon un réseau cubique comparable à celui du diamant et dont ils occupent les sommets, comme dans un diamant. Mais, contrairement à ce dernier, le pentadiamant présente un espace vide important au milieu de chaque maille cubique. Sa densité est plus faible que celle du diamant et comparable à celle du graphite. Reste à fabriquer cette petite merveille! ■

S. B.

Y. Fujii *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 125, article 016001, 2020

# L'ODYSSÉE DES GÈNES... AU QUÉBEC

Pierre Tremblay, marié en 1657 à Anne Achon, est l'aïeul des 80000 Tremblay du Québec! Un succès reproducteur remarquable et l'objet d'une des découvertes de l'anthropologie génétique racontées par Évelyne Heyer dans un livre palpitant qui vient de paraître chez Flammarion: *L'Odysée des gènes, sept millions d'années d'histoire de l'humanité révélées par l'ADN*. Extrait.

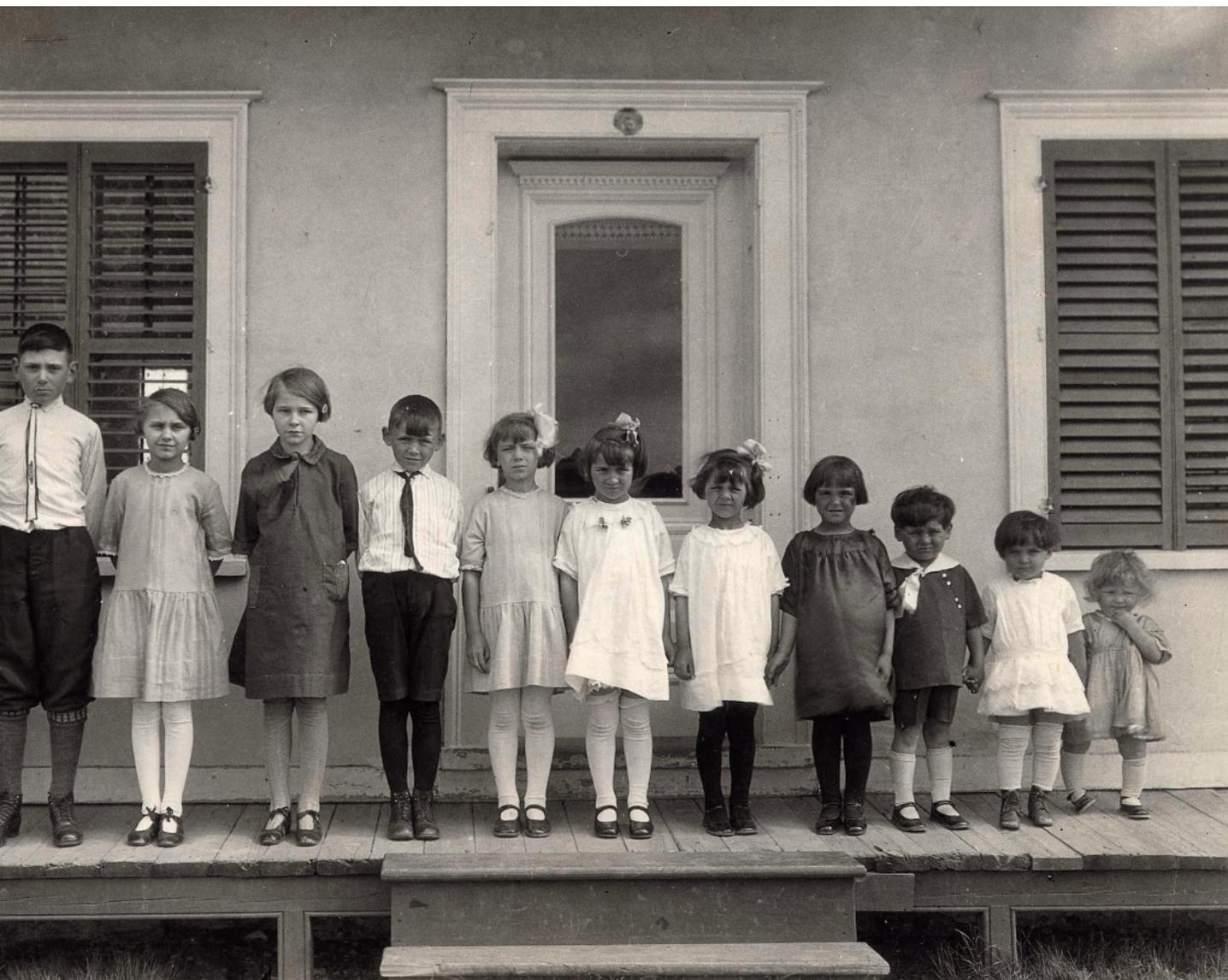


Entre le xvi<sup>e</sup> et le xix<sup>e</sup> siècle, c'est le temps des migrations transatlantiques, qui concerneront 3 millions d'Européens et entraîneront le déplacement forcé de 10 à 12 millions d'Africains en Amérique. Dans cette période ambivalente, mêlant le meilleur de l'humanité (l'exaltation pour les découvertes) et le pire (l'exploitation de l'Homme par l'Homme), la colonisation du Québec occupe une place intéressante pour la généticienne que je suis. J'ai eu la chance de travailler plusieurs années sur cette population dans un centre de recherche, à Chicoutimi, fondé par l'historien Gérard Bouchard. Montons donc à bord de La Grande Hermine, l'un des trois navires de la flottille de Jacques Cartier, et cinglons à travers l'Atlantique. C'est en 1534 que le célèbre Malouin aborde le golfe du Saint-Laurent et

«découvre» le Canada. Il s'empare aussitôt des terres actuelles du Québec, au nom de la couronne de France, et fonde la Nouvelle-France. Venus de métropole, des colons commencent bientôt à s'y installer et colonisent les terres. Ce sont surtout des hommes, jeunes, issus des villes, souvent des artisans, plus rarement des habitants des zones rurales. D'après les sources historiques, ils ne migrent pas pour échapper à la misère. Ainsi à La Rochelle, un port de départ important, les historiens ont montré que les départs étaient plus fréquents lors des périodes de prospérité. Les témoignages écrits laissés par ces pionniers évoquent l'espoir de mieux gagner sa vie, de faire fortune.

## LES FILLES DU ROY

Les femmes, elles, viennent aussi des villes, mais sont issues de toutes les couches sociales.



© Collection Centre d'archives de Québec - BANQ Québec, P1000, S4, D18, P4, Gériépy, Edgar

Sur les 2 000 Françaises au total qui poseront le pied au Québec, on a dénombré 850 jeunes filles pauvres. La plupart sont des «filles du Roy», des orphelines que le roi envoie en Nouvelle-France pour prendre possession du territoire.

Des familles se forment et s'établissent le long du fleuve Saint-Laurent. Bien que le climat soit rude, les taux de mortalité infantile sont plus faibles que ceux du royaume de France, si bien que les grandes familles deviennent la norme. Les longs hivers rigoureux limitent par ailleurs la propagation de maladies infectieuses. La croissance annuelle atteint ainsi un taux de 25/1 000, à comparer aux 3/1000 à la même période en France: entre 1681 et 1765, la population passe de 10 000 à 70 000 habitants, essentiellement du fait de l'accroissement naturel.

On estime qu'environ 10 000 immigrants français sont venus s'installer entre 1608

et 1760. C'est en 1763 que la France perd la Nouvelle-France au profit de l'Angleterre. La colonisation française s'arrête. Les immigrants sont désormais soit des protestants anglais, soit des catholiques irlandais. Or les deux communautés ne se mélangent pas avec les Français. Pour que ceux-ci ne soient pas submergés, le clergé francophone lance ce qui sera nommé la «guerre des berceaux»: bien que le territoire soit perdu pour la France catholique, l'Église se lance dans une politique de croissance démographique.

### LES VOIES DU SEIGNEUR

Dès lors, les familles de plus de 10 enfants ne sont pas rares. Ainsi, les femmes nées entre 1850 et 1880 dans la région administrative du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont en moyenne 7 enfants mariés et 38 petits-enfants. Les >

Jusqu'aux années 1950, les familles de plus de 10 enfants n'étaient pas rares au Québec. Cette forte fécondité, encouragée par le clergé catholique, a joué sur la diversité génétique des Québécois.

> registres indiquent même des valeurs extrêmes de 25 enfants mariés! Le curé de la paroisse veille au grain et passe régulièrement dans les maisons rappeler les femmes à leur devoir.

Une amie québécoise me racontait d'ailleurs que c'était encore le cas dans les années 1950. Sa mère a eu 6 enfants. Le dernier est venu au monde suite à un accouchement difficile, où elle a failli perdre la vie, si bien que le médecin lui a déconseillé une autre grossesse. C'était compter sans le curé local, venu la voir régulièrement pour la pousser à avoir encore un enfant en invoquant les voies du Seigneur. Le couple a refusé et a été excommunié, avec interdiction de venir

ascendantes ne suffisent pas. Il faut aussi savoir combien d'enfants a eu chaque individu au cours de sa vie, à quel âge, si ces enfants sont décédés avant de se marier et à quel âge, etc.

Pour obtenir ces informations, il est nécessaire de jumeler tous les actes d'état civil de façon à reconstruire un «fichier de population». Ce document livre la biographie démographique de chaque individu: son âge au décès, s'il s'est marié, à quel âge, avec qui, s'il a eu des enfants, à quel âge il les a eus, si ceux-ci se sont mariés. Grâce à ce fichier, on connaît les liens de parenté d'une personne avec le reste des individus. Ainsi, on peut savoir si ses parents étaient cousins, si son époux est un cousin, combien de petits-enfants ils ont eu... Ce document est une ressource précieuse pour comprendre comment une population humaine fonctionne. Bien que la démographie historique soit née en France, c'est au Québec qu'elle s'est automatisée et a pris une ampleur exceptionnelle. Voilà pourquoi les Islandais se sont inspirés du savoir-faire québécois pour créer leurs propres fichiers de population.

#### À LA RECHERCHE DE MALADIES RÉCESSIVES

Quelles périodes couvrent les fichiers de population du Québec? Un premier fichier recense de manière exhaustive tous les Québécois francophones du début de la colonisation au XVII<sup>e</sup> siècle jusqu'à 1800, date à laquelle le Québec comptait environ 200 000 habitants. Un second inventorie les régions du Saguenay-Lac-Saint-Jean et de Charlevoix de 1838 à 1971. Depuis, ce deuxième fichier a été étendu à d'autres régions du Québec et compile à ce jour 2,9 millions d'actes d'état civil.

La création du second fichier, au départ centré sur les régions de Charlevoix et du Saguenay-Lac-Saint-Jean, était motivée non seulement par des questions historiques, mais aussi par des questions médicales. Il faut préciser que, depuis plus de 50 ans, les médecins ont identifié un certain nombre de maladies génétiques exclusives à la région concernée. La plupart sont récessives: un individu n'est malade que s'il a reçu la mutation délétère, à la fois par son père et par sa mère (son ADN possède alors deux versions identiques du gène: on dit qu'il est homozygote pour la mutation). Or la fréquence d'apparition de ces maladies est élevée localement: elles concernent environ une naissance sur 1600. L'existence de porteurs de maladies récessives s'explique habituellement par la consanguinité proche. Pourquoi? Tout simplement parce qu'une personne ayant des parents apparentés proches peut recevoir la même mutation directement de leur ancêtre commun. Si les deux parents ne sont pas apparentés, il faut que chacun d'entre eux en soit porteur par hasard, ce qui est peu probable.

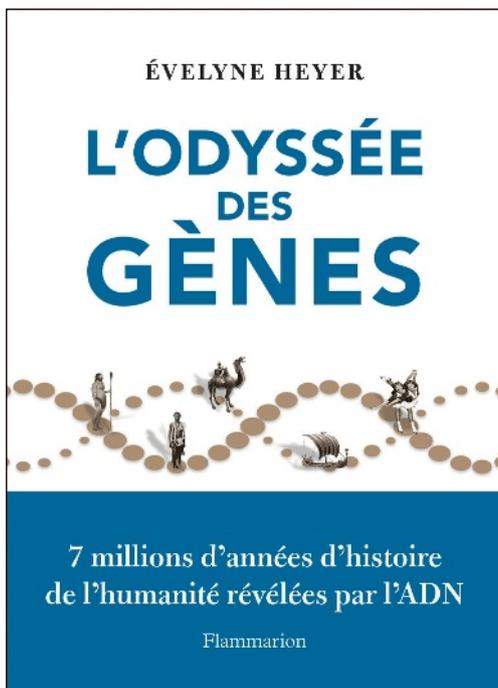
## Résultat inattendu: les malades ne sont pas plus consanguins que les autres

à la messe! Dans les années 1960 et 1970, les Québécois francophones feront la «Révolution tranquille» en s'affranchissant des règles du clergé. Le pays connaîtra alors une transition démographique, les familles passant rapidement de 6 ou 7 enfants en moyenne à moins de 2.

#### UNE BIOGRAPHIE DE CHAQUE HABITANT

La mainmise de l'Église a eu un avantage: la constitution de registres de paroisse, au sein desquels naissances, mariages, décès ont été soigneusement consignés et conservés. Une mine d'or pour les démographes. Mais, avant qu'ils aient pu les utiliser pour mieux plonger dans l'histoire du pays, un travail laborieux a été nécessaire: il a fallu dépouiller et transcrire ces actes, et surtout les jumeler. Cela consiste à attribuer un numéro unique à chaque individu, un identifiant, et à le relier à tous les actes d'état civil où il apparaît. Les férus de généalogie connaissent bien cette étape.

Comment procéder? Le plus simple est de partir des actes de mariage. Sur chaque acte est inscrit le nom des deux époux, mais aussi de leurs deux parents respectifs. Ces informations permettent d'identifier les parents des individus et de remonter, génération après génération, à leurs ancêtres. Mais, pour faire de la démographie historique, les généalogies



## UNE SAVANTURIÈRE AU PAYS DE L'ANTHROPOLOGIE GÉNÉTIQUE

**L**orsque vous regardez un film comme *La Guerre du feu* ou des documentaires sur Cro-Magnon et consorts, vous voyez des hommes blancs. Longtemps on a effectivement pensé que la peau des *Homo sapiens* sortis d'Afrique pour s'installer en Europe s'était rapidement éclaircie pour mieux synthétiser la vitamine D sous le faible soleil du nord. Mais de récentes découvertes en paléogénétique suggèrent que les Européens de l'Ouest avaient certes les yeux bleus (une mutation acquise il y a 40 000 ans), mais ont conservé une peau sombre pratiquement jusqu'au début du Néolithique, il y a 6 000 ans en France. Des résultats qui bouleversent nos représentations classiques, comme bien d'autres, racontés avec verve et pédagogie par Évelyne Heyer, professeuse d'anthropologie génétique au Muséum national d'histoire naturelle, dans son dernier livre. Car, depuis vingt ans, les progrès de l'informatique couplés aux techniques d'amplification et de séquençage de l'ADN ont permis de « faire parler » l'ADN ancien comme celui de nos contemporains, pour mieux comprendre la longue et complexe saga humaine depuis que notre lignée s'est séparée de celle des chimpanzés il y a 7 millions d'années. Mais il ne faut pas croire que ces recherches se mènent uniquement derrière un séquenceur ou un ordinateur : pour récolter les échantillons d'ADN nécessaires, Évelyne Heyer a bouclé une bonne partie de la planète, de l'Asie centrale jusqu'à la Mongolie en passant par l'Afrique et le Canada, et son récit est truffé d'anecdotes savoureuses sur ses voyages. Au fil des chapitres, on suit avec plaisir et curiosité cette Indiana Jones de la génétique explorer l'histoire des Pygmées, rappeler la véritable découverte de l'Amérique, suivre la grande chevauchée des Scythes ou le déferlement de l'armée de Gengis Khan sur l'Europe jusqu'à analyser les migrations contemporaines. Une épopée scientifique fascinante.

CÉCILE LESTIENNE

Évelyne Heyer, *L'Odysée des gènes, sept millions d'années d'histoire de l'humanité révélées par l'ADN*, Flammarion, 2020 – 384 pages, 22,90 euros.

Imaginez une mutation d'une fréquence de 1/100: un individu non consanguin a une probabilité de 1/100 de porter la mutation reçue par son père et 1/100 par sa mère, ce qui lui confère une probabilité d'être homozygote pour cette mutation de 1 sur 10 000 (100 × 100). Si les deux parents sont cousins germains et que leur grand-père commun porte la mutation (soit une probabilité de 1/100), il suffit qu'il la transmette à son petit-fils et à sa petite-fille, qui sont les deux parents (ce qui a une probabilité de se produire de 1/16), pour que l'enfant soit homozygote. La probabilité pour leur enfant de recevoir la mutation par son père et par sa mère est donc de 1/16 × 1/100, soit une probabilité 6 fois plus élevée que si ses parents n'étaient pas cousins germains. D'ailleurs, sur le pourtour méditerranéen, où ce que l'on nomme le mariage « arabe », c'est-à-dire le mariage entre cousins, est préféré, les personnes atteintes de maladies récessives sont en majorité les enfants issus de telles unions. Dans l'Église catholique, l'effet des mariages entre apparentés était bien connu. Il fallait une dispense pour se marier entre cousins proches, voire entre cousins jusqu'au 3<sup>e</sup> ou 4<sup>e</sup> degré selon les époques. L'analyse de ces dispenses a d'ailleurs permis de dessiner une cartographie de l'apparentement en France au XIX<sup>e</sup> siècle, et ce jusqu'au début du siècle suivant. La consanguinité est

très variable d'un département à l'autre. Son effet est bien connu dans les généalogies des rois de France et d'Europe. Les têtes royales souffrent de maladies récessives du fait des mariages récurrents entre cousins, qui ne sont pas rares.

### LE MYSTÈRE DE LA NON-CONSANGUINITÉ

Grâce aux généalogies reconstituées dans les régions de Charlevoix-Saguenay-Lac-Saint-Jean, il a été possible de calculer la consanguinité des individus malades par rapport aux autres. Et le résultat a été assez inattendu: les malades ne sont pas plus consanguins! D'une manière générale, la population du Saguenay n'est pas plus consanguine que n'importe quelle population européenne. Mais alors, comment expliquer cette fréquence élevée de malades? L'explication est simple: pour chacune des maladies, la mutation est fréquente dans la population.

En effet, pour chacune des maladies spécifiques de cette région, les taux de porteurs sains, c'est-à-dire les individus qui ne portent qu'une copie de ces mutations et qui ne sont donc pas malades, sont d'environ 1 sur 20 ou 30. Certaines des maladies sont spécifiques à la région (comme l'ataxie spastique de Charlevoix-Saguenay, la tyrosinémie de type 1, le pseudodéficit en vitamine D). D'autres sont >

5 QUESTIONS À  
ÉVELYNE HEYER

ÉVELYNE HEYER est professeuse en anthropologie génétique au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Propos recueillis par Cécile Lestienne

**Vous êtes professeuse en anthropologie génétique, une discipline suffisamment mal connue pour ne pas avoir d'occurrence dans Wikipédia. Comment la définiriez-vous ?**

C'est un champ disciplinaire dans lequel on utilise la génétique comme outil pour faire de l'anthropologie, c'est-à-dire pour étudier la diversité humaine – dans l'espace et dans le temps – sur le plan biologique, mais aussi sur le plan socioculturel. Les deux étant intimement liés, car des différences de langues, de religion, d'organisation sociale... créent des barrières plus ou moins poreuses aux flux de gènes entre les populations, et jouent ainsi sur leur évolution. C'est ce que nous étudions dans mon laboratoire du musée de l'Homme.

**Existe-t-il beaucoup d'équipes comme la vôtre ?**

De par le monde, on en compte une petite dizaine, qui toutes rassemblent des chercheurs ayant une très bonne formation à la fois en biologie, en mathématiques et en statistiques – voire en informatique –, et qui travaillent en étroite collaboration avec des chercheurs en sciences humaines : historiens, linguistes, sociologues, démographes... en fonction des projets.

**Comment est née votre passion ?**

Tout a commencé avec ma thèse de biométrie, que j'ai d'ailleurs menée dans un laboratoire d'historiens, pendant laquelle j'ai essayé de comprendre la forte prévalence de la maladie de Rendu-Osler

dans le Jura et notamment dans la vallée de la Valserine. Or cette forte prévalence d'une maladie génétique rare dans une région qui n'était pas isolée n'a pu s'expliquer que par des phénomènes culturels (voir page 23) : c'est ce qui m'a entraînée vers l'anthropologie génétique, une discipline qui exige beaucoup de terrain. Mes travaux m'ont par la suite amenée au Canada, en Afrique centrale, en Asie centrale jusqu'en Mongolie... et ces rencontres avec des populations très différentes m'ont non seulement nourri humainement, mais m'ont inspiré beaucoup de projets de recherche. De quoi combler quelqu'un comme moi qui aurais rêvé être une exploratrice au XIX<sup>e</sup> siècle.

**Comment est né ce livre ?**

Ce livre a deux raisons d'être. D'abord, je voulais montrer que la science peut aussi être une aventure et raconter la vie de terrain avec ses bonnes surprises – comme le plaisir de découvrir que l'on partage le même sens de l'humour avec des Pygmées – et ses dangereuses péripéties, comme lorsqu'en Sibérie nous avons failli mourir emportés par les eaux glaciales d'une rivière. Ensuite, ayant été commissaire générale de la rénovation du musée de l'Homme, j'avais envie de revenir sur les nombreuses découvertes exposées dans nos nouvelles salles. Et, encore une fois, rappeler que nous avons tous des ancêtres migrants, que nous sommes tous issus d'un mélange de gens que l'on pourrait définir comme « autres », dans l'espoir d'apporter ma pierre à une meilleure tolérance et un meilleur vivre-ensemble.

**Et quelles sont vos recherches en cours dont on ne trouvera pas encore les résultats dans ce livre ?**

J'ai de nombreux projets. Parmi les plus avancés : une sorte d'atlas de la diversité génétique en France métropolitaine au début du XX<sup>e</sup> siècle. Pour cela, nous sommes en train d'échantillonner 10 000 personnes réparties sur tout le territoire dont les quatre grands-parents étaient localisés dans l'Hexagone. Notre objectif est de voir s'il existe des différences sur le plan génétique entre les régions, lesquelles, et comment les expliquer. Par des migrations ? Par la variation des structures familiales ? Nous espérons notamment trouver des différences entre certains gènes impliqués dans la réaction immunitaire. Ou dans la perception du goût, avec l'idée de peut-être trouver un lien avec les traditions culinaires. Un autre projet consiste à étudier, grâce à l'ADN ancien, la population d'Île-de-France depuis le Néolithique jusqu'à nos jours. Nous avons pu avoir accès à près de 400 fossiles de huit périodes différentes. Nous espérons récupérer du matériel génétique de suffisamment bonne qualité chez au moins 200 individus, pour voir s'il y a continuité ou discontinuité de populations, puis évaluer quelle est la contribution des peuples anciens à la population d'aujourd'hui. Une autre façon d'explorer la question de « Nos ancêtres les Gaulois. »

> relativement courantes dans les populations européennes, comme la mucoviscidose (elle est présente au Saguenay-Lac-Saint-Jean au même taux que dans les régions françaises où la maladie est fréquente, comme en Bretagne).

À l'inverse, certaines maladies récessives relativement courantes dans les populations européennes (comme l'ataxie de Friedrich) sont absentes de l'est du Québec. Pour chacune de ces maladies de cette contrée, la mutation est maintenant bien connue, et sa signature moléculaire assure qu'elle est unique et spécifique de la population. Autrement dit, chacune de ces maladies n'a été amenée que par un individu dans la population. Cela a été possible en raison de la fondation de la population par un nombre restreint d'individus, qui ont contribué à la création du pool génique québécois et plus spécialement du pool de Charlevoix-Saguenay-Lac-Saint-Jean.

### À LA RECHERCHE DU PATIENT ZÉRO

Peut-on retrouver l'individu qui a amené chaque maladie au Québec? Et, une fois ce porteur initial retrouvé, peut-on identifier tous ses descendants qui sont potentiellement porteurs de la maladie? Grâce aux données de l'état civil, la reconstitution des généalogies ascendantes est facilement réalisable. Ainsi, avec mes collègues, nous avons parcouru les généalogies ascendantes d'environ 100 malades porteurs d'une maladie, celles-ci remontant à 2600 fondateurs d'avant 1700. Parmi ces derniers, une cinquantaine sont des ancêtres communs: ces fondateurs sont présents dans la généalogie ascendante de 95% des malades. En un mot, le porteur initial est l'un de ces 50 individus.

Puis, avec l'équipe à Chicoutimi, nous avons refait le même exercice en partant d'une autre maladie. Et le résultat a été surprenant: nous sommes remontés aux mêmes 50 fondateurs. En prenant au hasard un échantillon d'individus non porteurs de la maladie, les chercheurs sont là encore parvenus aux mêmes 50 fondateurs communs! En résumé, ce groupe des 50 représente les aïeux de tous les individus du Saguenay-Lac-Saint-Jean! Certains sont même ancêtres d'une grande partie de tous les Québécois francophones.

Non seulement ces ancêtres sont communs à de nombreux descendants, mais, en plus, ils sont reliés aux individus contemporains par bien des chemins généalogiques distincts (plus de 20 pour n'importe quel habitant dont les parents sont québécois francophones). Dès lors, leur contribution génétique aux individus actuels est élevée. En effet, un ancêtre lointain retrouvé une seule fois dans une généalogie contribue peu à un individu contemporain. C'est calculé en fonction du nombre de générations: on reçoit la moitié du génome de son père ou de sa mère, le quart d'un grand-parent, le huitième d'un arrière-grand-parent, etc.

Ainsi, un ancêtre dans notre généalogie à 10 générations contribue pour  $\frac{1}{2}$  puissance 10 à notre patrimoine génétique. Soit 0,1%. En revanche, si celui-ci est présent 20 fois dans la généalogie, sa contribution génétique peut monter fortement. La contribution génétique? Pour une portion de génome donnée d'un ancêtre, il s'agit de la probabilité que celle-ci se retrouve dans le descendant. Cette contribution peut aussi se comprendre comme le pourcentage moyen du génome d'un individu qui



## Un ancêtre éloigné de dix générations contribue pour 0,1% à notre patrimoine génétique

provient de cet ancêtre. L'ensemble de ces 50 fondateurs contribuent donc à 40% du pool génique des individus contemporains. Alors qu'à l'opposé, 60% des fondateurs participent à moins de 10% du pool génique.

### L'EFFET FONDATEUR

En simulant la transmission de gènes au fil des générations, nous avons démontré que les fondateurs avaient pu être porteurs des maladies aujourd'hui fréquentes dans la population. Est-ce inattendu? Oui et non. Non, car nous portons tous des mutations dans des gènes susceptibles d'entraîner des maladies quand elles se retrouvent en deux copies chez l'un de nos descendants (l'une héritée par le père et l'autre par la mère). Partons fonder une nouvelle population, dans une île ou sur Mars, et nos mutations pourraient devenir les maladies de nos descendants dans une dizaine de générations, comme au Québec.

C'est l'effet fondateur dont nous avons déjà parlé: par hasard, les fondateurs de la nouvelle population emportent avec eux un pool génique, qui est un sous-échantillon de celui de la population dont ils sont issus. Cela explique pourquoi certaines maladies génétiques relativement fréquentes en France n'ont pas « fait le voyage » jusqu'au Québec (comme l'ataxie de Friedrich) et qu'à l'inverse, d'autres sont courantes là-bas et inexistantes en France. Donc, non, faire remonter les gènes délétères jusqu'aux pères fondateurs n'était pas une >

> surprise. En revanche, il était inattendu qu'en si peu de générations – une dizaine, dans une population de grande taille –, certaines mutations atteignent des fréquences si élevées.

Pour continuer d'un point de vue comparable, il était surprenant que les pères fondateurs se résument presque à un cercle de 50 personnes. Souvent, les gens s'étonnent

le titre de la plus grande fréquence dans une généalogie: il apparaît 92 fois!

Pourquoi 50 fondateurs ont-ils eu une contribution si disproportionnellement élevée dans la population québécoise? Supposons qu'en moyenne, tous les fondateurs ont eu le même nombre de descendants au fil des générations: on ne retrouverait pas cette contribution génétique si déséquilibrée où 50 fondateurs comptent pour 40% du pool génique des individus du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Pour expliquer cette contribution si importante de certains fondateurs et pas d'autres, il faut retourner aux données démographiques et au taux de fécondité des ancêtres. Rares étaient les familles avec peu d'enfants. Mais, pour la génétique, seuls comptent les enfants qui s'établissent dans une population. Ceux qui meurent ou ceux qui émigrent avant de se reproduire ne contribuent pas au pool génique de la population.

Ce sont ce que l'on nomme «les enfants utiles». Si vous avez 7 enfants, mais qu'un meurt en bas âge et que les 6 autres quittent la population, votre contribution génétique à la génération suivante dans la population est nulle. À l'inverse, si vous avez 7 enfants et que les 6 qui survivent à l'âge adulte se marient et à leur tour ont des enfants dans la population, votre contribution génétique est de 6 enfants. Alors, pourquoi certaines familles ont un nombre d'enfants utiles beaucoup plus élevé que d'autres?

L'analyse détaillée des données démographiques a livré un résultat assez inattendu: certaines familles ont eu un grand nombre d'enfants mariés établis dans la population, qui à leur tour ont eu de nombreux enfants mariés dans la région, et ce schéma s'est répété; on observe une corrélation du succès reproducteur d'une génération à la suivante. Or ce lien ne concerne que les enfants mariés. Il est absent quand on mesure le nombre total d'enfants, qui inclut aussi les enfants qui meurent avant de devenir adultes et surtout ceux qui partent se marier autre part. Schématiquement, il existait des familles nombreuses dont la plupart des enfants restaient et s'établissaient dans la région et d'autres familles, nombreuses, mais dont les enfants partaient. La région était un front pionnier, ainsi il était possible pour certaines familles, tout en restant dans à proximité du Saguenay-Lac-Saint-Jean, d'aller défricher des bois localement pour installer tous ses enfants. Il n'est pas rare de décrire des familles qui comptent 100 petits-enfants établis dans la région!

C'est en quelque sorte cette tradition, dans certaines familles, de s'installer et de s'établir qui a entraîné la contribution génétique disproportionnée d'une poignée d'individus vivant au XVII<sup>e</sup> siècle. On parle de transmission culturelle du succès reproducteur, un phénomène que l'on retrouve en Asie centrale, où la



## Zacharie Cloustier et sa femme, Sainte Dupont, ont plusieurs millions de descendants

que, dans une même population, nous puissions présenter des ancêtres communs sans avoir besoin de remonter jusqu'à Mathusalem. Pourtant, imaginez un peu si nous avons tous des ancêtres différents... Partons de 100 000 Québécois francophones. Chacun a deux parents, quatre grands-parents, huit arrière-grands-parents. Si chaque ancêtre était différent, unique pour chaque individu, il faudrait que la population ait compté 400 000 habitants il y a 3 générations, 800 000 il y a 4 générations, et 3 200 000 en 1800 il y a 6 générations. Or la population québécoise comptait à l'époque 200 000 habitants!

C'est bien la preuve que les ancêtres dans une généalogie le sont aussi dans une autre et se retrouvent plusieurs fois dans la généalogie d'un individu: si vous êtes québécois, votre arrière-arrière-grand-père par votre mère est peut-être aussi votre arrière-arrière-grand-père par votre père et celui d'autres Québécois. Il y a environ 10 à 12 générations, la Belle Province ne comptait que quelques milliers de fondateurs. Chacun d'entre eux se retrouve donc répété un grand nombre de fois dans les généalogies.

### RECORDS

Un exemple? Zacharie Cloustier et sa femme, Sainte Dupont, apparaissent dans 81% des généalogies des Québécois mariés dans les années 1930 et sont comptés jusqu'à 50 fois dans une même généalogie. Cela peut sembler fou, mais tous deux ont plusieurs millions de descendants! Autre record, Pierre Tremblay, marié à Anne Achon à Québec en 1657 et à l'origine de tous les Tremblay du Québec, détient

transmission du succès reproducteur passe uniquement par les hommes.

### DANS LA VALLÉE DE LA VALSERINE

Les Français n'ont pas besoin de regarder loin de chez eux pour trouver de tels effets fondateurs. Le cas de la vallée de la Valserine, dans le département de l'Ain, que j'ai pu étudier, illustre à merveille le phénomène et a été très bien documenté. Dans cette magnifique vallée, située au sud des montagnes du Jura, se nichent plusieurs villages. Or les médecins y ont découvert une maladie endémique génétique: la maladie de Rendu-Osler (aussi connue sous le nom de télangiectasie hémorragique héréditaire). Ce mal cause des saignements de nez plus ou moins intenses et des hémorragies. Il touche les porteurs d'une mutation dans le gène *ACVRL1*.

La maladie est rapidement létale sous sa forme homozygote (on ne constate aucune naissance d'individus homozygotes, cette combinaison génétique n'étant pas viable quand la mutation est à la fois transmise par le père et par la mère). Elle aurait donc dû disparaître par sélection naturelle. Pourtant, elle est présente à des fréquences assez élevées, jusqu'à 1 sur 300 dans les arrondissements de Gex et de Nantua.

Comment expliquer une telle occurrence? A priori, face à ce type de maladie localisée, la théorie veut que la population concernée se



## Quand un ancrage généalogique procure un avantage reproductif

soit retrouvée longtemps isolée et que, par effet de dérive génétique, elle se soit glissée parmi les habitants et ait perduré au fil des générations. En effet, quand une population est de faible effectif et vit retirée, le phénomène de dérive s'accroît: le hasard de la reproduction a pour conséquence qu'une mutation peut augmenter en fréquence ou se maintenir, même si elle est contrée par la sélection naturelle.

Pour tester cette hypothèse, les historiens ont reconstitué toutes les généalogies des habitants de la vallée, de nos jours jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle. Soit 46 000 individus, pour lesquels on connaît la date de naissance, celle du mariage et les liens de parenté. Grâce à ces données, nous avons fait une première découverte:

tous les malades ne remontent pas à un ancêtre commun au XVIII<sup>e</sup> siècle! Or les données moléculaires signent sans ambiguïté que c'est bien une seule et même mutation que portent les malades. Cette mutation est donc antérieure au XVIII<sup>e</sup> siècle. Sa date a été estimée par calcul de probabilité: elle aurait été portée par un ancêtre unique datant du XVI<sup>e</sup> siècle. Elle est donc ancienne, et, depuis toutes ces générations, elle aurait en quelque sorte «échappé» à la sélection naturelle.

Seconde surprise: en analysant tout au long de l'histoire les lieux de naissance des couples mariés, on s'est rendu compte que la vallée n'avait pas été isolée: 30% des mariages ont eu lieu avec un individu étranger. Or, pour qu'il y ait une dérive forte, il faut que la population soit fermée. Rien n'allait plus: la mutation était ancienne, et la population était ouverte à la migration...

### PROPRIÉTAIRE DES TERRES ET... DE LA MUTATION

Comment résoudre ce paradoxe? J'ai pu analyser dans le détail les généalogies. Et un résultat est tombé: les individus ancrés dans la population, c'est-à-dire ceux dont la plupart des ancêtres viennent de la vallée, ont eu davantage d'enfants restant sur place que les autres. Le lien suit une belle corrélation: plus un individu d'une génération donnée a des ancêtres dans la population, plus il a un grand nombre d'enfants établis dans la vallée. Bref, un ancrage généalogique procure un avantage reproductif. À l'inverse, les individus dont un ou deux des parents ou grands-parents ont migré dans la vallée sont désavantagés en termes de reproduction.

C'est ainsi que la population s'est retrouvée comme structurée entre un noyau d'individus stables sur un grand nombre de générations d'une part, et, d'autre part, une frange d'individus mobiles qui ne font que passer une ou deux générations dans la vallée.

L'explication réside assez simplement dans l'accès aux terres: les individus du noyau possèdent des champs et des pâturages, qu'ils transmettent à leurs descendants. Sans propriété foncière, les migrants sont moins enracinés que les autres et partent plus facilement. Si les individus du noyau stable ont un avantage reproductif par rapport à eux, c'est pour des raisons purement socio-économiques et de transmission de biens.

Mais revenons à la maladie de Rendu-Osler: ce sont bien les individus du noyau stable de la population qui portent cette mutation. Et l'avantage social d'appartenir au noyau compense le désavantage associé à la présence de cette maladie. C'est un beau cas où le social compense le biologique, en termes d'évolution génétique tout au moins!





LA CHRONIQUE DE  
**GILLES DOWEK**

# UN MÉTRO, UNE LIGNE APRÈS L'AUTRE

Rome ne s'est pas faite en un jour. Cet adage s'applique aux villes, au réseau des lignes de métro, mais aussi à des logiciels.



Le métro parisien s'est construit ligne après ligne. Il en résulte un réseau qui semble loin d'être optimal et qui répond à une logique propre.

**Q**uand nous voyons le plan du métro d'une grande ville, nous pouvons nous interroger sur le processus morphogénétique qui a produit une forme aussi baroque. Car, si nous avions demandé à un ingénieur d'imaginer le meilleur plan possible, il aurait cherché à disposer les lignes et les stations de manière à ce que le trajet pour aller d'un point de la ville à un autre soit le plus court, tout en maintenant le coût total du projet inférieur au budget alloué. J'ignore quelle est la solution de ce problème d'optimisation sous contrainte, mais il est probable que ce soit une forme beaucoup plus symétrique que le plan du métro de Londres, de Paris ou de Tokyo.

Mais ce n'est pas ainsi que nous construisons les métros. En général, nous construisons une première ligne, puis quelques années après, une deuxième, puis une troisième, etc. Et, à chaque fois que nous construisons une nouvelle ligne, nous nous demandons certes comment cette ligne contribue à un projet d'ensemble, qui ne sera sans doute jamais

achevé, mais surtout comment répondre à des besoins plus immédiats, par exemple de rentabilité de la nouvelle ligne. De plus, même quand un projet initial existe, chaque génération le redéfinit, parce que les techniques, les attentes et les modes évoluent et parce que des leçons sont tirées des expériences passées. Quand un projet est ainsi redéfini,



**Même quand un projet initial existe, chaque génération le redéfinit**



les lignes déjà construites sont comparables aux contraintes géographiques et géologiques: elles sont là et elles ne peuvent plus beaucoup être modifiées.

Il semble donc que nous puissions classer les objets techniques en deux types idéaux, avec, bien entendu, de nombreux intermédiaires: les objets rapidement construits, tels une maison ou un poste de radio, et les objets lentement

construits, tels le métro d'une grande ville, une cathédrale ou une ville elle-même. Le projet initial des premiers est en général presque parfaitement réalisé. Mais, pour les seconds, chaque génération tend à repenser le projet, le modifier, le moderniser, l'adapter à un cahier des charges qui évolue en permanence.

Ainsi, Maurice de Sully, qui a décidé en 1160 de construire une cathédrale à Paris, et Eugène Viollet-le-Duc, qui l'a «terminée» en 1864, utilisaient des techniques différentes, répondaient à des attentes différentes et avaient sans doute aussi une vision différente de ce qu'est une cathédrale. Même le Paris du baron Haussmann, le Brasilia d'Oscar Niemeyer et de Lúcio Costa ou le Canberra du couple Marion et Walter Griffin se transforment avec le temps, parce que Haussmann, Niemeyer, Costa et les Griffin disposaient d'une quantité limitée d'information sur ces villes et que davantage d'information est devenue disponible quand elles ont été construites.

Quel lien avec les logiciels? Nous avons tendance à penser que les logiciels sont des objets rapidement construits, dont le projet initial est réalisé presque parfaitement. Mais nous devons constater que certains logiciels, tel le système d'exploitation GNU/Linux, sont nés il y a plus de trente ans et que leur développement se poursuit encore, parce que, depuis l'époque des disquettes, les techniques de développement et les attentes des utilisateurs ont évolué.

Les métros, les cathédrales, les villes, les logiciels, etc. semblent se développer selon une logique propre, qui peut presque être qualifiée d'«organique». Certains vont plus loin et voient dans leur évolution un processus spontané, aléatoire ou hors du contrôle humain. Il ne faut cependant pas oublier que, même si le développement de ces objets est long, erratique et contraint par l'héritage du passé, ils restent l'œuvre des êtres humains qui les conçoivent. ■

**GILLES DOWEK** est chercheur à l'Inria, enseignant à l'École normale supérieure de Paris-Saclay et membre du Comité national pilote d'éthique du numérique.

**Vous êtes un fidèle lecteur de  
*Pour la Science* et vous êtes concerné  
par la vie de votre magazine ?**

**Q** u'il s'agisse de choisir la prochaine couverture du magazine, de débattre des thématiques abordées ou de construire un nouveau format de revue, votre point de vue nous est précieux et nous permet de répondre au mieux à vos attentes. C'est en maintenant le lien avec vous que nous souhaitons avancer.

Pour cela, nous souhaitons constituer un **Club de lecteurs**. Pour y participer, il s'agirait dans un premier temps de nous faire part de votre désir de contribuer à ce projet et de nous en dire plus sur vous.

Pour plus de détails et pour répondre au formulaire d'inscription, merci de vous connecter à l'adresse suivante :

[pouurlascience.fr/statics/club-lecteurs](http://pouurlascience.fr/statics/club-lecteurs)

**Nous avons  
besoin de votre  
avis !**

**En vous remerciant pour  
votre fidélité et pour le  
temps accordé,**

L'équipe de *Pour la Science*





LA CHRONIQUE DE  
**VIRGINIE TOURNAY**

## OGM : UNE HISTOIRE JURIDIQUEMENT BROUILLÉE

L'histoire récente du génie génétique dans le domaine agricole est peu connue. Ce serait la faute à la réglementation des OGM, qui ne reflète ni les risques ni les potentialités agronomiques.



**M**aïs, soja, moustiques génétiquement modifiés et autres OGM... Peu connaissent bien l'histoire récente du génie génétique. L'origine des techniques de manipulation du génome n'a pourtant rien de mystérieux. Les manuels scolaires la situent à l'avènement de la biologie moléculaire avec la découverte des enzymes de restriction il y a près d'un demi-siècle.

L'usage de ces ciseaux moléculaires, qui permettent de couper l'ADN à des endroits spécifiques, s'est accru avec l'arrivée, au début des années 1980, de la PCR (*polymerase chain reaction*), technique qui amplifie les gènes d'intérêt. Des plantes transgéniques résistantes à différents pathogènes ont ainsi été commercialisées, avant que se déclenche fin 1996, en France, une marée d'hostilité, notamment suite à la une alarmante du quotidien *Libération*: «Alerte au soja fou». Avec l'arrivée en Europe d'une cargaison américaine de la plante transgénique dans le contexte anxieux de la maladie de la

«vache folle», le génie génétique a basculé dans le débat public et politique.

Sauf à être expert du domaine, on peine depuis à suivre les avancées du génie génétique en matière agricole. En effet, l'histoire technique de la sélection végétale s'est dissoute dans une bataille

### Le caractère artificiel ou naturel dépend des perceptions culturelles

entre pro-OGM et anti-OGM. La confusion de l'histoire sociale et du récit scientifique est cependant moins prononcée lorsque des applications biomédicales telles que les vaccins ou les thérapies géniques sont concernées.

Cette confusion est en partie liée à l'hypermédiatisation des préoccupations alimentaires et sanitaires. Mais elle tient surtout de la logique réglementaire qui vise à préciser l'essence de ce qu'est un OGM.

La directive OGM (2001/18) du Parlement européen a ainsi défini ces organismes comme résultant «d'un matériel génétique ayant été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement [...]». Or les humains sélectionnent des variétés végétales depuis des millénaires sans qu'on assimile celles-ci à des OGM. Dans le droit, cette qualification dépend des techniques utilisées et non pas des propriétés finales du produit, ce que retient pourtant l'histoire des innovations.

Le caractère artificiel ou naturel de ces organismes est impossible à objectiver et dépend de perceptions culturelles. En témoigne le positionnement du Haut conseil des biotechnologies (HCB) sur les techniques de modification génétique devant, ou non, être incluses dans le champ de la directive. L'avis de son comité scientifique du 15 juillet 2020 souligne une équivalence biochimique entre les organismes issus de mutagenèse aléatoire *in vitro* ou *in vivo*, et les mutants «naturels», tandis que la recommandation de son Comité économique, éthique et social mentionne que, pour certains des membres, ces organismes échappent aux réglementations de l'évolution «naturelle».

Ces renégociations sur la nature des OGM découlent de la décision du 25 juillet 2018 de la Cour de justice de l'Union européenne, qui établit que les organismes issus des nouvelles applications de mutagenèse sont des OGM. En application, le Conseil d'État inclut les techniques *in vitro*, pourtant de nature comparable à celles déjà utilisées en amélioration des plantes et exemptées de la directive... Alors, *to be OGM or not to be?* En se référant aux procédés utilisés plutôt qu'au rapport bénéfice/risque des produits obtenus selon la technique, le droit fixe des catégories *a priori* qui ne recourent pas toujours les risques ni les potentialités agronomiques. La logique réglementaire complique ainsi l'écriture du récit scientifique des biotechnologies. Et sans une histoire partagée, la confiance des citoyens se perd... ■

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



## L'ESSENTIEL

> En exploitant le spin, une propriété quantique des électrons, il est possible de concevoir des composants électroniques aux caractéristiques inédites.

> Grâce à la spintronique, il est envisageable de placer des unités de mémoire au plus près des processeurs, à l'image

des synapses et des neurones du cerveau.

> Les premiers prototypes ont démontré que les dispositifs reposant sur la spintronique sont peu énergivores et ont des performances comparables aux algorithmes de réseaux de neurones usuels.

## LES AUTEURS



**JULIE GROLLIER**  
chercheuse à l'unité mixte de physique CNRS/Thales, à Palaiseau



**DAMIEN QUERLIOZ**  
chercheur au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (université Paris-Saclay/CNRS), à Palaiseau

# Quand la spintronique s'inspire du cerveau

En termes d'énergie, le cerveau est beaucoup plus efficace que les ordinateurs actuels pour mémoriser, calculer ou apprendre. Est-il possible de s'inspirer de cet organe pour réaliser des dispositifs plus performants ? Oui, en s'appuyant sur le spin des électrons...

Grâce aux jonctions tunnel magnétiques, il est possible de concevoir des neurones et des synapses artificiels. Économes en énergie, ils pourraient avantageusement remplacer les algorithmes de réseaux de neurones.





**L**es algorithmes d'intelligence artificielle ont fait des progrès considérables ces dernières années. Ils sont de plus en plus présents dans notre quotidien et sont utilisés pour analyser le contenu de textes ou d'images, pour reconnaître des instructions vocales, et souvent avec une efficacité supérieure aux humains. Ainsi, en 2017, le programme *AlphaGo* a battu le champion du monde coréen Ke Jie au jeu de go, un exploit qu'aucun expert n'attendait avant au moins dix ans.

Cependant, pour parvenir à de telles performances, ces algorithmes consomment des quantités très élevées d'électricité, beaucoup plus que notre cerveau pour des tâches équivalentes. Par exemple, les modèles d'intelligence artificielle de traitement du langage humain, comme BERT (ou sa version française FlauBERT) nécessitent une énergie de mille kilowattheures pour être entraînés. C'est autant que consomme le cerveau humain en six ans!

L'intelligence artificielle moderne, qui s'appuie sur des algorithmes réalisant des réseaux de neurones artificiels dits « profonds », s'inspire pourtant partiellement de la structure du cerveau (*voir l'encadré ci-contre*). Pourquoi donc un tel contraste dans les performances? Les programmes d'intelligence artificielle tournent aujourd'hui sur des ordinateurs classiques, ou sur leurs cousins les cartes graphiques, dont l'architecture et le principe de calcul sont bien différents de ceux du cerveau.

Pour résoudre ce défi énergétique, de nombreux chercheurs et industriels développent de nouvelles approches visant une électronique dont le fonctionnement serait vraiment calqué sur celui du cerveau. C'est le cas de la spintronique, où l'on exploite certaines propriétés quantiques des électrons. Des dispositifs reposant sur cette technique sont capables de simuler le comportement des neurones du cerveau et des synapses qui les relient. Nous sommes encore loin du stade de l'industrialisation d'une solution complète fondée sur la spintronique, mais les premiers résultats sont déjà très prometteurs.

## UNE SÉPARATION CALCUL-MÉMOIRE ÉNERGIVORE

Dans les ordinateurs actuels, l'obstacle majeur pour économiser de l'énergie et gagner en vitesse est lié au fait que les informations sont stockées dans une mémoire physiquement séparée des processeurs, où les données sont transformées en suivant les instructions du programme. Or les algorithmes d'intelligence artificielle comportent des millions, voire des milliards, de paramètres. Lorsqu'un tel programme opère, il doit sans cesse chercher des informations en mémoire puis les additionner ou les multiplier dans le processeur, avant de

les replacer dans la zone de stockage. Ce flux permanent de données par une voie de communication unique consomme une quantité d'électricité considérable.

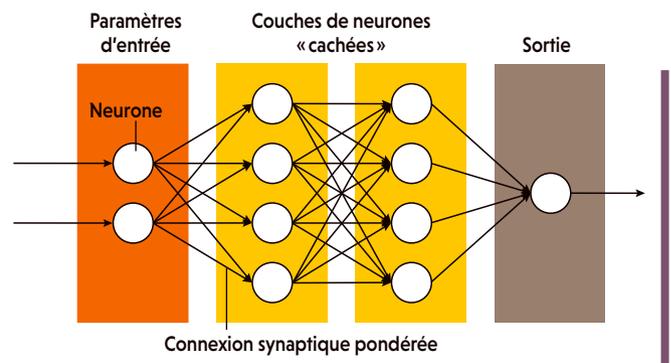
Dans le cerveau, le fonctionnement est très différent. La mémoire est partout: elle est distribuée et stockée dans les synapses, les connexions entre les neurones qui, eux, exécutent des opérations sur les données. Chaque neurone est connecté en moyenne à dix mille synapses, ce qui permet notamment de réaliser des calculs en parallèle. Cette juxtaposition entre calcul et mémoire, doublée d'un traitement parallèle, est d'une redoutable efficacité énergétique.

La nature même du calcul est une autre source de gain considérable d'énergie. Nos ordinateurs manipulent des données très précises, chacune étant codée sous la forme de bits d'information. Les opérations sur ces données

## LES ALGORITHMES DE RÉSEAUX DE NEURONES

**L**es « réseaux de neurones » de l'intelligence artificielle, en particulier ceux dits « d'apprentissage profond », ne sont pas des structures physiques, mais des algorithmes dont le principe s'inspire du fonctionnement du cerveau. Ils représentent des nœuds, les neurones, reliés entre eux par des synapses. Dans le cas de l'apprentissage profond, les neurones sont organisés en couches. Le nombre de couches et de neurones par couche dépend de la tâche à accomplir par le réseau : analyse d'images, de textes, de sons... Le signal d'entrée est envoyé aux neurones de la première couche, qui transmettent un signal à ceux de la suivante, etc.

Au niveau de chaque neurone, les signaux issus de la couche précédente sont additionnés suivant une somme pondérée par les coefficients portés par les synapses, coefficients qui définissent la « fonction synaptique ». Cette dernière est configurée grâce à une phase d'apprentissage du réseau de neurones. On soumet des données en entrée du réseau, qui effectue un calcul et compare la solution obtenue à celle qu'on lui fournit. Prenons par exemple un réseau de neurones formé à reconnaître des images de chats. Si, pour une photo donnée, le réseau se trompe, les pondérations synaptiques sont corrigées par une méthode mathématique nommée « rétropropagation du gradient ». Celle-ci s'appuie sur des outils statistiques pour calculer la variation d'une erreur au niveau d'un neurone, de la dernière couche vers la première. Après un certain nombre d'itérations, la fonction synaptique est alors correctement configurée pour que le réseau de neurones reconnaisse les images de chats avec un taux d'erreurs très faible.



se font suivant des opérations logiques d'une rigueur implacable. Cette précision, assurément cruciale pour de nombreuses applications comme envoyer une fusée dans l'espace, ne l'est pas pour d'autres, comme reconnaître un visage familial. Or le fait d'imposer à un circuit électronique un comportement parfait où l'aléa n'est pas toléré à un coût élevé en énergie, car il faut éliminer tous les bruits parasites et corriger toutes les erreurs.

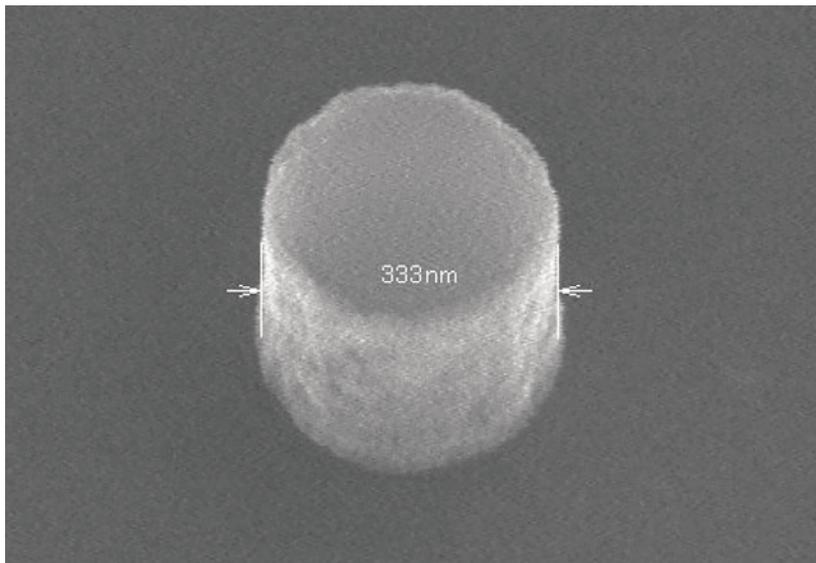
Au cours de l'évolution, le cerveau, qui ne dispose que d'une source d'énergie limitée – nos apports caloriques quotidiens – a développé une toute autre stratégie. Il fonctionne sur la base d'un compromis entre la fiabilité du traitement de l'information et la dépense énergétique. Les synapses et les neurones ont ainsi des comportements stochastiques: en intégrant une certaine marge d'aléatoire, ils ne donnent pas toujours un résultat identique même s'ils reçoivent des informations similaires.

En contrepartie, pour assurer tout de même un traitement fiable de l'information, le cerveau met en œuvre de multiples stratégies. Par exemple, comme chaque neurone, pris individuellement, n'est pas très fiable, plusieurs de ces cellules cérébrales sont parfois chargées de traiter le même signal. Un résultat cohérent et stable est ensuite déduit de l'ensemble de leurs réponses. La redondance est, en fin de compte, moins coûteuse en énergie qu'un système trop rigide qui corrige systématiquement les erreurs.

De plus, les signaux stockés dans les synapses et traités par les neurones ne sont pas des «0» ou des «1» (codage binaire) comme dans l'électronique actuelle. Ces signaux présentent une grande gamme de valeurs différentes et très proches: ils contiennent ainsi bien plus d'information, mais sont plus sensibles aux perturbations, autrement dit au «bruit». Enfin, contrairement aux processeurs où chaque élément opère au rythme d'une horloge unique, assurant un fonctionnement cohérent, mais limitant la vitesse du traitement de l'information, le cerveau travaille de façon asynchrone: chaque neurone émet des signaux électriques selon son propre rythme et s'en sert pour communiquer efficacement avec d'autres neurones, qui se trouvent parfois dans une zone différente du cerveau.

## LE CERVEAU, SOURCE D'INSPIRATION

Ces spécificités contribuent à rendre le cerveau plus économe en énergie. Est-il possible de s'en inspirer pour construire des composants électroniques ou puces capables de traiter des données avec très peu d'énergie? Avec des neurones et des synapses électroniques installés au plus près, de façon à rapprocher mémoire et calcul, il serait possible de reproduire



Les jonctions tunnel magnétiques (telle celle-ci, vue au microscope électronique à balayage) sont fabriquées en plusieurs étapes. On fait croître les couches de matériaux l'une après l'autre par pulvérisation cathodique dans une enceinte sous vide. Ensuite, pour obtenir des jonctions d'un diamètre inférieur au micromètre, le matériau est recouvert d'une résine électrosensible et d'un masque sur lequel est dessinée la forme de la jonction. L'ensemble est soumis à une source d'électrons (lithographie) et la résine exposée est conservée. Les parties non protégées par la résine du matériau sont gravées et retirées pour ne garder que la forme de la jonction.

l'architecture équivalente à celle du réseau de neurones que l'on veut faire fonctionner. Cette idée n'est pas récente. Dès la fin des années 1980, Carver Mead, chercheur à Caltech (l'institut de technologie de Californie) et l'un des pères fondateurs de la microélectronique moderne, a inventé le concept de circuits «neuromorphiques», dont l'objectif est de mimer l'architecture neurobiologique du cerveau. Cette approche a longtemps été délaissée, car les obstacles technologiques étaient nombreux.

Le premier obstacle concerne la mémoire: les techniques de l'électronique actuelle ne permettent pas aujourd'hui d'intégrer d'importantes quantités de mémoire au plus près du calcul. En effet, les seuls circuits de mémoire qui peuvent être intégrés dans les processeurs (les circuits de mémoire vive statique) sont extrêmement coûteux, car ils utilisent une grande et précieuse surface dans le processeur. C'est pour cette raison que les processeurs n'intègrent que de très faibles capacités de stockage, la plus grande part de la mémoire étant physiquement distribuée en dehors des zones de calcul. Plusieurs pistes sont néanmoins à l'étude pour rapprocher mémoire et processeurs (voir l'encadré page 33). Parmi elles, l'électronique de spin, ou spintronique, a connu des progrès spectaculaires ces dernières années.

Cette technique n'exploite pas uniquement les électrons au travers de leur charge électrique, mais utilise aussi leur spin, une propriété purement quantique, assimilable à un moment cinétique (on peut représenter le spin d'un électron comme une petite flèche orientée). Comme le spin est responsable du moment magnétique intrinsèque de l'électron, quand une majorité d'électrons ont un spin pointant dans une direction privilégiée dans un matériau, ce dernier a une aimantation non nulle. La spintronique exploite les interactions >

> des spins portés par les électrons du courant électrique avec des matériaux magnétiques.

Concrètement, les briques de base de la spintronique sont des petits cylindres d'une dizaine de nanomètres de diamètre formant des «jonctions tunnel magnétiques». Ces jonctions sont constituées de deux couches de matériaux magnétiques (des nanoaimants) séparées par une couche isolante. Quand les deux nanoaimants sont orientés dans le même sens, un courant électrique traverse facilement (par l'«effet tunnel», un effet quantique) la couche isolante de la jonction: la résistance est faible. Si les orientations sont opposées, le courant circule difficilement: la résistance est alors élevée.



## L'apprentissage d'un réseau de neurones comme BERT consomme 1 000 kilowattheures

Ces propriétés permettent de stocker de l'information dans un format binaire («0» ou «1») selon les deux cas d'orientation possible (voir l'encadré page 34). Les composants de mémoire ainsi formés sont nommés MRAM (*magnetoresistive random-access memories*). Ils ont commencé à être développés vers le milieu des années 1980. Cependant, pour changer la valeur d'un bit, il fallait appliquer un champ magnétique externe afin d'inverser l'orientation d'un nanoaimant. C'était un obstacle à la miniaturisation de ces composants.

En 1996, John Slonczewski, chercheur chez IBM, et Luc Berger, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, ont indépendamment proposé une amélioration importante de ces composants. Ils ont mis en évidence un nouvel effet, le transfert de spin. Lorsque les électrons d'un courant traversent un nanoaimant de la jonction, leur spin interagit avec celui des électrons dans la couche: le spin des électrons du courant se polarise et s'aligne avec l'aimantation de la couche. Dans une jonction, l'aimantation d'un des deux nanoaimants est fixe tandis que l'autre peut être modifiée. Quand un courant polarisé traverse cette dernière couche, elle réoriente l'aimantation. Selon le sens de circulation du courant, il est possible d'écrire un bit «0» ou un bit «1», et cela sans faire appel à un champ magnétique extérieur.

Cette découverte a ouvert la porte à la conception de MRAM intégrées.

Depuis, plusieurs fabricants de systèmes microélectroniques produisent des dispositifs de mémoire qui exploitent cette technique. Ils peuvent intégrer un milliard de ces composants sur une puce de silicium. Ces mémoires trouvent déjà des applications en électronique usuelle, car elles associent les qualités des deux grandes familles de mémoires informatiques: la vitesse de lecture et d'écriture des mémoires vives et la capacité des mémoires de stockage à conserver durablement les informations.

On se rapproche de l'idée de puces neuromorphiques, car il est possible d'insérer facilement des jonctions tunnel magnétiques aux endroits les plus utiles pour stocker des données sous forme de bits au sein des circuits en silicium qui réalisent les opérations de calcul. Comme dans le cerveau, où les synapses sont au contact des neurones, ces synapses artificielles seront ainsi au plus près du cœur de calcul en silicium. Si l'on veut utiliser un algorithme de réseau de neurones dans ce dispositif, il suffit donc de configurer toutes ces synapses avec les bonnes valeurs pour définir la tâche du programme. Selon le jeu de valeurs mis en place, le réseau sera en mesure d'identifier des éléments dans des images, du son...

En réduisant drastiquement les échanges de données entre mémoire externe et processeur, il est possible d'exécuter des algorithmes d'intelligence artificielle en dépensant moins d'énergie. Cette piste est activement explorée dans les laboratoires académiques comme industriels. Elle n'est cependant pas entièrement satisfaisante: il faut connaître à l'avance les bonnes valeurs à mémoriser par les synapses pour effectuer une tâche. Le dispositif n'a pas les capacités d'adaptation d'un vrai cerveau. On souhaite, idéalement, un circuit qui soit en mesure d'apprendre à réaliser de nouvelles opérations.

### INITIALISER LES SYNAPSES

Dans les algorithmes de réseaux de neurones, on a souvent une première phase, dite «d'apprentissage», où le réseau ajuste la valeur des synapses afin d'exécuter de mieux en mieux la tâche qui lui est assignée. Malheureusement, la technique par laquelle l'algorithme identifie les bonnes valeurs des synapses dans les réseaux de neurones artificiels est fondée sur une méthode mathématique complexe, la «rétropropagation du gradient» (voir l'encadré page 30). Celle-ci exige des calculs nombreux, très précis et donc gourmands en énergie. Elle est bien adaptée sur un ordinateur, mais pas nécessairement pour un système inspiré du cerveau fonctionnant avec des calculs moins précis.

Pour rester dans la logique des systèmes neuromorphiques, au lieu de reproduire cette méthode énergivore, il serait plus judicieux de >

## LES DIFFÉRENTES APPROCHES NEURO-MORPHIQUES

Dans un ordinateur usuel, les données sont stockées dans une mémoire physique séparée du processeur où sont exécutés les calculs ; on parle d'« architecture de von Neumann ». Ce système simple à mettre en œuvre est cependant énergivore et sa vitesse est limitée. Pour rapprocher les mémoires des processeurs, la spintronique est une piste, mais il existe d'autres possibilités.



### SPINTRONIQUE

Cette technique repose sur des jonctions tunnel magnétiques. La résistance d'une jonction, qui dépend de l'orientation de l'aimantation de ses deux couches magnétiques, encode des bits « 0 » et « 1 ». Ces composants peuvent être configurés pour agir comme des synapses ou des neurones artificiels.

- + Physique particulièrement riche et comprise
- Fabrication difficile



### TRANSISTORS

Il est possible de concevoir des neurones et des synapses avec des transistors au silicium, mais pour réaliser un unique neurone, il faut des centaines de transistors. Cette idée a été mise en application dans les puces TrueNorth, d'IBM, et Loihi, d'Intel.

- + Accessible dès aujourd'hui
- Mémoires extrêmement coûteuses



### MEMRISTORS

Ces composants électroniques, par exemple en dioxyde de titane, ont une résistance qui dépend du courant qui les traverse. Leur état est fonction de l'historique des courants qui ont déjà été appliqués. Ces mémoires artificielles exhibent ainsi une certaine capacité de plasticité synaptique.

- + Fabrication simple
- + Composants bon marché
- Fiabilité réduite



### MÉMOIRES À CHANGEMENT DE PHASE

Ces composants contiennent des matériaux, tels que des verres de chalcogénure, qui basculent d'une phase cristalline à amorphe sous l'effet de la chaleur. La résistance électrique des phases amorphes est supérieure à celle des phases cristallines, ce qui permet d'encoder des bits « 0 » et « 1 ».

- + Technologie mature
- Consommation énergétique



### OPTIQUE

Dans un ordinateur optique, les photons émis par des lasers remplacent les électrons. Le signal lumineux est directement traité grâce à des composants optiques qui sont plus rapides que les transistors électriques. Il est également possible de concevoir des dispositifs de mémoire avec ces composants optiques.

- + Calculs très rapides
- Mise en œuvre complexe (miniaturisation difficile des composants)
- Forte consommation énergétique

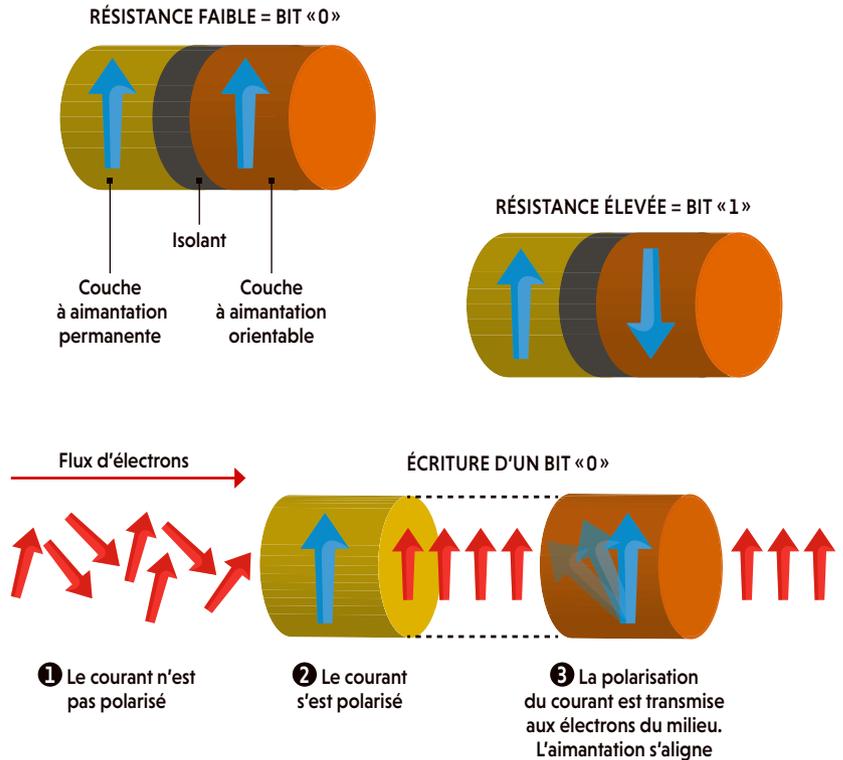
# MANIPULER LES SPINS DES ÉLECTRONS

Dans les circuits électroniques actuels, la manipulation de la charge électrique de l'électron est au cœur du fonctionnement des dispositifs, à l'instar des transistors. En électronique de spin, ou spintronique, on utilise, en plus de la charge, une autre propriété quantique des électrons, le spin. Celui-ci correspond à un moment magnétique intrinsèque de la particule. Les interactions de ce spin avec certains matériaux magnétiques offrent la possibilité de concevoir des composants aux comportements très riches. Dans un matériau magnétique, comme le fer ou le cobalt, le spin des électrons est globalement orienté dans une même direction, ce qui confère au matériau son aimantation. Lorsqu'un courant électrique traverse un tel matériau, le spin des électrons qui constituent le courant s'oriente dans la direction de l'aimantation. Cet effet donne lieu à deux phénomènes fondamentaux en spintronique.

Le premier est le phénomène de magnétorésistance observé dans les « jonctions tunnel magnétiques ». Ces composants sont constitués de deux couches aimantées séparées par une couche isolante. Les matériaux utilisés dépendent des propriétés que l'on veut donner à la jonction. L'isolant est souvent un oxyde métallique et son épaisseur est d'environ 1 à 2 nanomètres. L'aimantation d'une couche magnétique est fixe tandis que l'autre peut être réorientée.

En 1975, Michel Jullière, de l'Insa de Rennes, a été le premier à mettre en évidence la magnétorésistance à effet tunnel. Lorsqu'un courant électrique traverse une jonction tunnel magnétique, la traversée de la couche isolante s'effectue grâce à l'effet tunnel (un phénomène purement quantique). Le courant passe plus facilement si les aimantations des deux couches magnétiques pointent dans la même direction, et plus difficilement si les aimantations sont orientées dans des directions opposées.

Ainsi, en mesurant la résistance électrique (faible ou élevée) d'une jonction tunnel magnétique, on peut « lire » la direction respective des aimantations. On associe ainsi un bit « 0 » à des aimantations parallèles et un bit « 1 » à des aimantations antiparallèles. Ces jonctions tunnel magnétiques peuvent ainsi servir d'élément de base dans des systèmes de mémoire pour stocker des bits d'information.



Une importante activité industrielle s'est développée autour des mémoires reposant sur ce principe et qualifiées de MRAM (*magnetoresistive random-access memory*).

La découverte d'un effet analogue dans des systèmes multicouches métalliques, la magnétorésistance géante, en 1988, a été décisive pour l'intérêt porté au développement de la spintronique, et a valu le prix Nobel de physique en 2007 à Albert Fert, de l'université Paris-Saclay, et Peter Grünberg, de l'université de Cologne. Cette technique et la magnétorésistance tunnel sont utilisées notamment dans les têtes de lecture des disques durs modernes.

Le fait d'avoir une couche dont l'aimantation est « mobile » permet de réorienter cette dernière pour que la jonction porte un bit « 0 » ou « 1 ». Pour écrire ce bit, l'approche initiale a été d'utiliser un champ magnétique extérieur, mais cette méthode ne permet pas une bonne réduction de la taille du système et son intégration à des échelles nanométriques.

En 1996, John Slonczewski, chercheur chez IBM, et Luc Berger, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, ont mis en évidence le second phénomène crucial de la spintronique : le transfert de spin. Lorsqu'un courant électrique suffisamment intense traverse une jonction tunnel magnétique, il peut faire basculer l'aimantation de la couche à aimantation mobile pour obtenir une configuration parallèle ou antiparallèle. Pour écrire

un bit « 0 » (voir ci-dessus), le courant traverse d'abord la couche à aimantation fixe. Il se polarise : le spin des électrons du courant, qui n'avait initialement pas d'orientation particulière, s'aligne avec l'aimantation de la couche. Quand les électrons arrivent dans la seconde couche, ils interagissent avec les électrons du matériau et leur transfèrent leur polarisation. L'aimantation de cette couche devient progressivement parallèle à l'autre.

Pour être plus précis, à chaque interface (entre une couche magnétique et l'isolant), une partie des électrons est réfléchi et une autre est transmise. Pour écrire un bit « 1 », le courant arrive par la couche à aimantation mobile. Il se polarise d'abord selon l'aimantation de cette couche. Mais les électrons qui sont réfléchis sur la couche à aimantation fixe prennent une polarisation un peu plus antiparallèle et transmettent cette orientation à la couche à aimantation mobile. Résultat : on obtient une configuration antiparallèle, correspondant à un bit « 1 ».

Depuis 2008, de nombreux industriels exploitent les jonctions tunnel magnétiques à transfert de spin pour concevoir des dispositifs de mémoire performants.

> s'inspirer encore une fois de la façon dont le cerveau apprend. En particulier, les synapses biologiques ne servent pas juste comme mémoire, elles sont aussi au cœur du mécanisme de l'apprentissage. Elles sont en effet «plastiques»: elles ajustent leur activité selon la quantité d'information à laquelle elles sont exposées. Par exemple, quand deux neurones connectés par une synapse sont actifs en même temps, cette synapse s'en trouve renforcée avec une activité accrue. Mais ce renforcement n'est pas toujours complet, sinon, d'une certaine façon, chaque nouveau signal effacerait la subtile configuration de la synapse élaborée au cours de toute son expérience passée.

En transposant ce principe aux dispositifs spintroniques, cela reviendrait à modifier la valeur des synapses artificielles en fonction du signal qu'elles reçoivent. Et effectivement, il est possible de reproduire une certaine plasticité avec ces systèmes. Quand une tension électrique est appliquée à une jonction tunnel magnétique, l'effet de transfert de spin met en mouvement l'aimantation d'un de ses nanoaimants. Si la tension est assez élevée et appliquée assez longtemps, ce mouvement entraîne l'inversion de l'aimantation du nanoaimant, et donc de la valeur stockée par la jonction tunnel magnétique. Mais ce renversement n'est pas toujours prédictible: si la tension n'est pas appliquée pendant une durée suffisante, parfois l'aimantation se retourne, parfois non. Plus la tension appliquée à la jonction est élevée, plus la probabilité de basculement de l'aimantation est importante, sans pour autant atteindre 100%.

## UNE CAPACITÉ D'APPRENTISSAGE

Dans une mémoire usuelle, ce comportement incertain doit être évité à tout prix. Pour un système neuromorphique, on obtient des synapses qui, sous l'action des signaux qu'elles reçoivent, transforment progressivement la fonction du réseau de neurones dont elles font partie et adaptent la réponse du système à la nouvelle tâche sans avoir besoin d'utiliser des méthodes aussi lourdes que la rétropropagation du gradient.

En 2015, avec nos collègues, nous avons montré qu'un système équipé de mémoires spintroniques plastiques pouvait apprendre à compter des véhicules sur une autoroute (avec une précision de 95%) ou à reconnaître des chiffres manuscrits, de la même façon que l'aurait fait un algorithme usuel d'intelligence artificielle. Sur ces tâches relativement simples, les performances s'approchent des techniques plus traditionnelles d'apprentissage des réseaux de neurones (qui reposent cependant sur plus de synapses, avec une consommation plus élevée en énergie). En revanche, sur des tâches complexes (comme concurrencer un

spécialiste du jeu de go), les techniques d'apprentissage bio-inspirées sont pour l'instant loin de rivaliser avec les techniques plus conventionnelles.

Si nous sommes capables de réaliser des synapses artificielles qui stockent de l'information et dont il est possible de moduler la réponse pour simuler la plasticité synaptique et le phénomène d'apprentissage, un système complet neuromorphique doit aussi inclure des neurones pour effectuer les calculs.

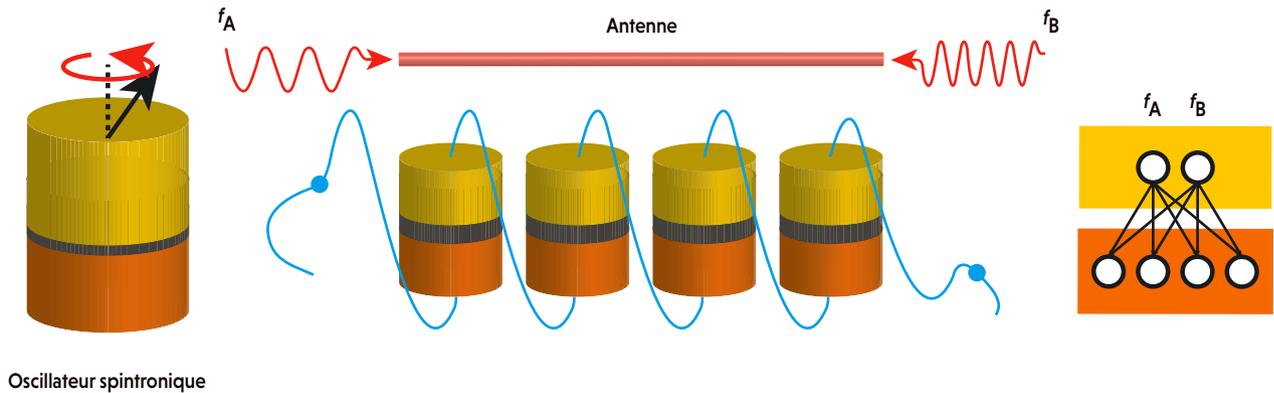


# Pour réaliser un unique neurone artificiel avec des transistors, il en faudrait des centaines

Le cerveau humain contient près d'une centaine de milliards de neurones, et les algorithmes d'intelligence artificielle simulent aujourd'hui jusqu'à des dizaines de millions de neurones. Est-il envisageable de réaliser des neurones avec les techniques actuelles de transistors au silicium? D'abord, si l'on veut autant de composants dans une puce électronique de la taille d'un pouce, il faudrait que chaque neurone ait une largeur bien inférieure à un micromètre, ce qui est impossible, car réaliser même un unique neurone artificiel par cette approche nécessite des centaines de transistors.

Par exemple, la puce TrueNorth conçue par IBM en 2014 est une démonstration impressionnante d'électronique neuromorphique qui ne fait pas appel à la spintronique. Ce système comporte cinq milliards de transistors (un nombre considérable), ce qui permet d'implémenter un million de neurones et des centaines de millions de synapses. En rapprochant ainsi centre de calcul et mémoire, IBM affirme que la puissance consommée par la puce est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle d'une puce usuelle.

En réalité, l'architecture de la puce TrueNorth ne contient pas un million de neurones. Un neurone artificiel de ce type occupe une trop grande surface pour en mettre un million sur une puce. En revanche, cette puce est extrêmement rapide; dès lors, un seul circuit >



Oscillateur spintronique

La jonction tunnel magnétique peut aussi être utilisée comme un neurone qui traite l'information. Pour cela, les caractéristiques de la jonction sont telles que le courant qui la traverse fait tourner de façon permanente l'aimantation de la couche supérieure (à gauche). La jonction émet alors un signal impulsionnel comme un neurone biologique.

Ce composant se comporte aussi comme un émetteur-récepteur d'ondes radio. Dans une expérience, les chercheurs ont associé quatre neurones artificiels qui synchronisaient aussi leurs signaux grâce à une antenne (au centre). Ce réseau de neurones (schématisé à droite) est capable de reconnaître des voyelles prononcées (dont la signature était réduite à deux fréquences caractéristiques  $f_A$  et  $f_B$ ).

numérique implémente plusieurs neurones artificiels (ceux qui seraient physiquement situés autour), en faisant successivement les calculs associés à chacun d'eux. C'est une petite, mais très pragmatique, entorse à l'idée de base du neuromorphisme de faire des neurones et synapses artificiels. En 2017, Intel a développé une puce analogue, mais plus modeste, Loihi, qui n'implémente que 130000 neurones. Ces dispositifs restent volumineux et il est difficile de penser qu'il sera possible de rivaliser avec le cerveau humain en suivant cette approche.

La spintronique fournit là encore une piste. Il est possible d'utiliser une jonction tunnel magnétique pour imiter les fonctions clés des neurones du cerveau. En particulier, ces derniers communiquent en émettant des impulsions électriques. Ces impulsions sont toutes identiques, mais leur nombre dépend de la sollicitation du neurone. Si un neurone reçoit beaucoup d'impulsions pendant un temps court, la fréquence avec laquelle il va engendrer des impulsions sera alors également élevée. S'il est stimulé par peu d'impulsions, il en émettra lui-même un nombre réduit.

Avec de l'électronique traditionnelle, il est difficile de réaliser des neurones impulsionnels de taille nanométrique. En effet, produire des impulsions à un certain rythme nécessite de créer des boucles de rétroaction dans le circuit électronique, ce qui occupe de la place. Il est en revanche possible de fabriquer des jonctions tunnel magnétiques qui reproduisent ce comportement.

Une solution consiste à prendre les signaux d'entrée sous la forme de courants électriques qui sont additionnés (exactement comme dans un neurone biologique) avant d'être injectés dans la jonction. Ensuite, on choisit les caractéristiques du dispositif de telle sorte que le spin transféré par les électrons du courant entrant ne conduit pas à un basculement complet de l'aimantation du nanoaimant, mais la fait osciller et tourner en

permanence, telle une boussole dont l'aiguille pivoterait sur elle-même. Comme la configuration respective des deux aimantations (celle fixe et celle en rotation) change périodiquement, la résistance électrique de la jonction (on parle d'effet de magnétorésistance) s'en trouve affectée et se traduit par un signal électrique périodique. Plus le courant entrant est important, plus la vitesse de rotation sera grande et la fréquence des impulsions engendrées sera élevée. On obtient bien un comportement très similaire à celui d'un neurone. En outre, ce phénomène est réalisable à température ambiante et est très stable pour des dispositifs nanométriques. Il peut donc être exploité pour des dispositifs concrets.

## RECONNAISSANCE DE CHIFFRES : 99,6 % DE RÉUSSITE

En 2017, avec nos équipes, nous avons montré expérimentalement qu'une jonction tunnel magnétique pouvait effectivement imiter un neurone. Nous sommes même allés plus loin : nous avons utilisé une jonction unique pour imiter un réseau entier de quatre cents neurones grâce à une stratégie dite «de multiplexage temporel», la jonction jouant tour à tour le rôle de chaque neurone. Nous avons ensuite utilisé ce réseau de neurones spintroniques pour identifier des chiffres prononcés par différentes personnes.

Pour ce faire, nous avons converti les signaux audio à reconnaître en courant électrique injecté à travers la jonction tunnel magnétique. Ce courant injecté, qui correspond aux chiffres prononcés mille fois plus vite (pour être dans la bonne gamme de fréquences du dispositif), provoque une rotation de l'aimantation d'un nanoaimant de la jonction. Ce faisant, grâce à l'effet de magnétorésistance, le neurone convertit les modulations du courant en variation de la tension électrique à ses bornes. Nous avons enregistré ces variations de tension électrique provenant des neurones spintroniques, que nous avons

transmises à un ordinateur qui a simulé l'ensemble du réseau de neurones avec ses fonctions synaptiques. Ces dernières ont alors été configurées grâce à une phase d'apprentissage pour reconnaître les chiffres parlés. Puis, soumis à de nouveaux échantillons de paroles, le réseau identifiait correctement les chiffres avec un taux de succès de 99,6%, ce qui représente une performance exceptionnelle. Cette expérience a démontré la capacité des jonctions tunnel magnétiques impulsives à imiter les neurones de façon fiable.

Les travaux dans le domaine de la spintronique à des fins neuromorphiques sont encourageants. Notre futur défi sera de réaliser des réseaux de neurones complets comportant des millions de jonctions tunnel magnétiques jouant le rôle de neurones et de synapses. Comme on l'a vu, l'industrie sait déjà les intégrer par milliards sur des puces et les relier à des circuits électroniques classiques pour faire des mémoires, ce qui constitue une base solide pour aller plus loin.

La spintronique n'a pourtant pas fini de nous surprendre. Les jonctions tunnel magnétiques seraient capables d'imiter d'autres propriétés du cerveau, comme la synchronisation de neurones distants. En effet, dans le cerveau, des impulsions conduisent des neurones parfois très éloignés à accorder leurs réponses, en les déclenchant au même moment. Cette synchronisation a de nombreux avantages. Des neurones qui émettent des impulsions en même temps auront plus d'importance dans le traitement du signal. S'ils sont connectés au même neurone, celui-ci reçoit un très grand nombre d'impulsions dans un bref laps de temps et, ainsi, il les transmet très efficacement à son tour. Des populations entières de neurones se coordonnent par ce phénomène, au point de créer des ondes cérébrales qui, grâce à leur puissance, modifient le comportement de neurones dans d'autres aires cérébrales, parfois lointaines.

## DE MINUSCULES ÉMETTEURS-RÉCEPTEURS

Les jonctions tunnel magnétiques ayant un fonctionnement très rapide, elles produisent des impulsions électromagnétiques à une fréquence pouvant dépasser quelques centaines de mégahertz. Le traitement de l'information se fait ainsi des millions de fois plus vite que dans le cerveau. Mais, autre conséquence, ces dispositifs se comportent comme des nanoémetteurs radio. Or ces jonctions sont aussi très sensibles aux ondes électromagnétiques environnantes, lesquelles peuvent modifier leur génération d'impulsions: les jonctions sont donc aussi de très bons récepteurs radio. En ajustant correctement les caractéristiques d'un ensemble de jonctions, il est possible de les synchroniser entre elles grâce aux

signaux qu'elles émettent et reçoivent... comme les neurones biologiques!

Induire ce type de comportement synchronisé dans des réseaux de neurones artificiels est une piste passionnante pour coordonner matériellement et efficacement des réseaux de neurones spécialisés dans des tâches différentes. Dans cette optique, en 2018, avec nos collègues, nous avons étudié un système de quatre jonctions tunnel magnétiques dont la tâche était de reconnaître des voyelles prononcées oralement (voir la figure page 36). Le signal vocal était réduit



# Grâce au multiplexage, une jonction a imité quatre cents neurones



à deux fréquences (par analyse de Fourier) et accéléré 100000 fois pour être émis par une antenne aux quatre nanooscillateurs. De façon très intéressante, dans cette expérience, nous avons constaté que la capacité des jonctions à coordonner leurs rythmes augmentait les performances de classification des signaux vocaux.

Pour aller plus loin, nous cherchons désormais à réaliser des réseaux dont les neurones communiquent par les ondes électromagnétiques qu'émettent et reçoivent les jonctions. Il s'agit là d'une piste prometteuse pour interconnecter les neurones dans un réseau dense, ce qui est une condition indispensable pour l'implémentation de tâches complexes. À terme, un système complet associera ces jonctions jouant le rôle de neurones à des synapses artificielles à base de MRAM, pour lui donner une capacité d'apprentissage.

Que pourront alors réaliser de tels systèmes? Notre objectif n'est pas d'obtenir une intelligence capable de rivaliser avec l'intelligence humaine: notre connaissance du cerveau est bien trop partielle pour un tel résultat. En revanche, nous souhaitons concevoir une intelligence artificielle plus économe en électricité et qui soit plus rapide que celles disponibles actuellement. Ainsi, nous réduirons la consommation énergétique considérable des centres de calcul qui traduisent des textes ou interprètent ce que nous disons à nos enceintes intelligentes, et nous aurons la possibilité d'embarquer de tels dispositifs dans nos téléphones portables ou dans des véhicules autonomes pour nous assister dans notre vie quotidienne. ■

## BIBLIOGRAPHIE

J. Grollier, D. Querlioz et al., **Neuromorphic spintronics**, *Nature Electronics*, 2 mars 2020.

M. Romera et al., **Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators**, *Nature*, vol. 563, pp. 230-234, 2018.

J. Torrejon et al., **Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators**, *Nature*, vol. 547, pp. 428-431, 2017.

N. Locatelli et al., **Spintronic devices as key elements for energy-efficient neuroinspired architectures**, *IEEE Xplore: Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, 2015.



# CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de plus de 270 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2021

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

**DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE**

**BIOINFORMATIQUE**

**GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION**

**TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT**

**SCIENCES DE L'INGÉNIEUR**

**PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION**

**CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX**

**CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS**

**CHIMIE ANALYTIQUE**

**MICROSCOPIE ET IMAGERIE**

**BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE**

**BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE**

**BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES**

**QUALITÉ ET SÉCURITÉ**

**SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE**

**COGNITION ET COMPORTEMENT**

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de **former plus de 1600 professionnels chaque année** issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

## LES NOUVEAUTÉS PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2021

### DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

• Python et le module Pandas pour gérer et analyser des données du 27 au 29/01/2021  
MONTPELLIER - 2,5 jours 1 400€

• Deep learning pour le traitement automatique des langues du 31/05 au 02/06/2021  
GIF-SUR-YVETTE - 3 jours 1 500 €

• Machine learning et deep learning pour la vision par ordinateur du 14 au 16/06/2021  
LYON - 2,5 jours 1 600 €

• Deep learning pour le traitement et l'analyse d'images médicales du 16 au 18/06/2021  
VILLEURBANNE - 2,5 jours 1 600 €

### BIOINFORMATIQUE

• Bioinformatique pour la métagénomique du 10 au 12/05/2021  
MONTPELLIER - 2,5 jours 1 200 €

### GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION

• Gestion d'applications Cloud avec l'orchestrateur Kubernetes (concepts et pratique) du 26 au 27/05/2021  
GRENOBLE - 2 jours 1 000 €

### TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

• LiDAR et photogrammétrie pour la numérisation de terrain : instrumentation, mesure et modélisation du 08 au 11/03/2021  
CAEN - 3,5 jours 1 200 €

### SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

• Acquérir et dialoguer en Python du 22 au 26/03/2021  
GIF-SUR-YVETTE - 4 jours 1 600 €

• Visualiser en temps réel et interagir avec ses données en Python du 05 au 08/04/2021  
GIF-SUR-YVETTE - 3 jours 1 350 €

### PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

• Fabrication additive : dépôt par jet d'encre du 30/03 au 01/04/2021  
TOULOUSE - 3 jours 1 400 €

• Micro- et nano-électronique : évolution, état de l'art et perspectives des technologies CMOS, Beyond-CMOS et Mémoires du 29/09 au 01/10/2021  
GRENOBLE - 2 jours 1 000 €

Découvrez l'ensemble des stages de formation sur  
[cnrsformation.cnrs.fr](http://cnrsformation.cnrs.fr)

Pour organiser une formation sur mesure  
contactez-nous à [cfe.contact@cnrs.fr](mailto:cfe.contact@cnrs.fr) ou 01 69 82 44 55



### CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

- Liquid foams and emulsions: generation, stability and properties du 17 au 19/03/2021  
STRASBOURG - 3 jours 1 500 €

### CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

- Cristallisation : recherche des conditions de cristallisation et des polymorphes à l'aide de montages expérimentaux microfluidiques et multi-puits du 24 au 26/03/2021  
MARSEILLE - 3 jours 1 900 €
- Procédés d'oxydation avancée pour le traitement des eaux du 07 au 08/04/2021  
NANCY - 1,5 jour 700 €

### CHIMIE ANALYTIQUE

- Utilisation de la spectrométrie de masse haute résolution (HR-MS) : principe et applications du 30/03 au 02/04/2021  
PALAISEAU - 3,5 jours 1 800 €
- Interprétation de spectres de masse obtenus lors de l'analyse de molécules bio-organiques polyfonctionnelles en LC-MS et LC-MS/MS du 23 au 26/11/2021  
PALAISEAU - 3,5 jours 1 600 €

### MICROSCOPIE ET IMAGERIE

- Histologie : de la préparation d'échantillons à la validation des marquages par analyse d'image du 22 au 25/03/2021  
NANTES - 4 jours 1 800 €

### BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

- Biologie cellulaire de la peau : applications cosmétiques et pharmaceutiques du 29 au 31/03/2021  
ORLEANS - 3 jours 1 900 €
- Neuro-electrophysiology: from patch-clamp to in vivo recordings du 12 au 16/04/2021  
VALBONNE - 5 jours 2 400 €
- Biologie dans les systèmes microfluidiques du 11 au 12/10/2021  
PARIS - 2 jours 1 300 €

### BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

- Virologie fondamentale, moléculaire et structurale du 04 au 05/11/2021  
GIF-SUR-YVETTE - 2 jours 1 000 €

### BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

- Apport de l'imagerie du petit animal dans la mise en oeuvre des 3R en expérimentation animale le 23/03/2021  
A distance - 0,5 jour 300 €
- Éthologie et bien-être animal le 06/04/2021  
A distance - 0,5 jour 300 €
- Ethologie du cheval : cycle complet du 17/05/2021 au 25/11/2022  
6 modules de 5 jours 5 700 €
- L'anesthésie des animaux de laboratoire le 18/05/2021  
A distance - 0,5 jour 300 €

- Douleur et analgésie des animaux de laboratoire le 02/06/2021  
A distance - 0,5 jour 300 €
- Éthique en expérimentation animale le 21/09/2021  
A distance - 0,5 jour 300 €
- Biostatistiques en expérimentation animale le 19/10/2021  
A distance - 0,5 jour 300 €

### QUALITÉ ET SÉCURITÉ

- Evaluation du risque chimique : méthode et application du 01 au 02/07/2021  
GIF-SUR-YVETTE - 2 jours 1 000 €

### SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE

- Introduction à l'intelligence technologique le 04/06/2021  
BORDEAUX - 1 jour 500 €

### COGNITION ET COMPORTEMENT

- Faire évoluer un comportement : introduction le 05/03/2021  
LILLE - 1 jour 500 €
- Faire évoluer un comportement : identifier les causes du 02 au 04/06/2021  
LILLE - 3 jours 1 200 €
- Faire évoluer un comportement : intervenir sur les causes du 25 au 26/11/2021  
LILLE - 2 jours 900 €

## L'ESSENTIEL

> La distanciation sociale en cas de maladie est pratiquée par divers animaux : mammifères, poissons, oiseaux, insectes...

> Les animaux sociaux modifient certains de leurs comportements comme l'épouillage pour se tenir à l'écart et stopper la

propagation de maladies qui pourraient les décimer.

> Les stratégies de distanciation sociale varient : elles vont de l'éloignement de tout animal malade au maintien des relations avec les individus les plus apparentés.

## LES AUTRICES



**DANA HAWLEY**  
professeuse à l'Institut polytechnique et université d'État de Virginie (Virginia Tech), aux États-Unis



**JULIA BUCK**  
maîtresse de conférences à l'université de Caroline du Nord à Wilmington, aux États-Unis

# Les animaux aussi gardent leurs distances

Afin d'échapper à la maladie, divers animaux tels que des langoustes, des oiseaux, des fourmis ou des singes pratiquent la distanciation sociale... spontanément, sans directives administratives !

**A**u cœur d'un récif de l'archipel des Keys, à l'extrême sud de la Floride, une jeune langouste blanche (*Panulirus argus*) s'en revient de sa nuit passée à rechercher des mollusques et pénètre dans son repaire. Les langoustes ont l'habitude de partager ces fentes rocheuses et, cette nuit, un nouvel arrivant s'y est installé. Mais ce dernier est un peu bizarre. Son urine dégage une odeur inhabituelle. Elle contient des substances produites quand la langouste est infectée par un virus contagieux noté *Panulirus argus Virus 1*, ou PaV1. La jeune langouste en bonne santé qui était de retour semble sur le qui-vive. Aussi difficile soit-il de trouver un abri aussi bien protégé des prédateurs que le sien, elle fait marche arrière et s'éloigne vers la pleine mer, loin du virus mortel.

La réaction des langoustes au virus – observée à la fois *in situ* et en laboratoire – est la même que celle que nous n'avons que trop

expérimentée cette année : la distanciation sociale. Pour freiner l'épidémie de Covid-19, les interactions physiques avec autrui ont été fortement limitées, notamment *via* les mesures de confinement. Cela a été pénible. Et nombreux sont ceux qui se sont interrogés sur la nécessité de telles mesures.

Pourtant, aussi contre nature que cela puisse paraître, la distanciation sociale fait partie intégrante du monde naturel. Outre les langoustes, des animaux aussi différents que des singes, des poissons, des insectes et des oiseaux sont capables de détecter des congénères malades, et en conséquence de s'en tenir à distance.

Ce comportement est fréquent chez les animaux sociaux, car il augmente leurs chances de survie. En effet, la vie en groupe permet aux animaux de capturer plus facilement leurs proies, de se tenir chaud et d'éviter les prédateurs, mais elle favorise aussi la propagation de maladies contagieuses, comme pourrait en >



> témoigner n'importe quel parent dont l'enfant va à la garderie. Ce risque a favorisé une évolution des comportements susceptibles d'aider les animaux à éviter les infections. Ceux qui maintiennent une certaine distance sociale pendant une épizootie ont plus de chances de rester en vie. Et, de fait, ils augmentent leurs chances d'engendrer une descendance qui pratiquera à son tour la distanciation sociale lorsqu'elle sera confrontée à la maladie.

C'est ce que les écologues appellent l'«immunité comportementale». Les animaux sauvages ne sont pas vaccinés, mais ils peuvent se protéger des maladies en adoptant des modes de vie et des comportements adéquats.

Toutefois, cette immunité comportementale n'est pas sans coût. La distanciation sociale, même temporaire, fait perdre un certain nombre des avantages qui ont, au départ, justement favorisé la vie sociale. En fait, les chercheurs ont appris que l'évitement total n'est que l'une des stratégies adoptées par les animaux pour réduire le risque de transmission. Il existe des espèces sociales dont les membres restent ensemble bien que certains soient infectés, mais qui, alors, modifient certaines de leurs interactions, lors du toilettage par exemple, ou qui limitent leurs interactions avec les individus jouant un rôle particulier dans la colonie, comme dans le cas des fourmis.

## UN SACRIFICE QUI EN VAUT LA PEINE ?

La capacité des langoustes à détecter et à éviter leurs congénères infectées a été la clé de leur survie face au virus PaV1, qui tue plus de la moitié des langoustes juvéniles qu'il infecte. Elles présentent en effet une forte vulnérabilité au virus, car elles sont si grégaires qu'elles se tassent jusqu'à 20 individus dans le même abri. Mais c'est ainsi, regroupées au cœur d'éponges, de coraux ou de crevasses rocheuses, en brandissant et en faisant claquer leurs pinces, qu'elles parviennent à se défendre contre les prédateurs tels que les poissons balistes.

C'est au début des années 2000 que Don Behringer, de l'université de Floride, et ses collègues ont remarqué que certaines jeunes langoustes vivaient seules dans leur repaire, bien que cela les rende très vulnérables. Puis ils ont constaté que la plupart d'entre elles étaient infectées par le virus. Ils ont supposé qu'elles n'avaient pas choisi de vivre seules, mais qu'elles avaient été bannies.

En 2006, pour vérifier leur hypothèse, ils ont placé des langoustes bien portantes dans des aquariums où elles devaient choisir leur refuge : vide ou occupé par un congénère, qui était soit en bonne santé, soit malade. Dans le premier cas, ils ont observé que les langoustes se montraient sociables et choisissaient les repaires occupés par une langouste en bonne



Quand elles sont infectées par un champignon, les fourmis noires des jardins (*Lasius niger*) se tiennent éloignées de leur colonie.

## L'évitement total n'est que l'une des stratégies adoptées pour réduire le risque de contagion

santé plutôt que ceux qui étaient vides. En revanche, dans le second cas, elles ont préféré rester seules et ont évité les abris contenant des langoustes infectées.

Comment est-ce possible ? En 2013, Don Behringer et son collègue Joshua Anderson ont montré que les langoustes sont capables de repérer leurs congénères malades grâce à la chimioréception de signaux provenant de l'urine. En effet, il s'est révélé que les urines des langoustes infectées contiennent des substances qui constituent des signaux d'alerte pour les langoustes en bonne santé. Ainsi, dès que les scientifiques bloquaient, avec une colle adéquate, les voies urinaires des langoustes



infectées, leurs congénères saines ne les évitaient plus (à la fin de l'expérience, la colle a été enlevée et les langoustes ont survécu).

En 2015, Mark Butler et ses collègues, de l'université Old Dominion, en Virginie, ont mené une expérience dans l'archipel des Keys pour corroborer ces résultats. Ils ont attaché une langouste malade dans un refuge de langoustes en bonne santé. Ils ont alors constaté que, le plus souvent, elles abandonnaient l'abri pour la pleine mer où elles couraient pourtant un risque bien supérieur d'être dévorées. Puis ils ont répété l'expérience en attachant, cette fois, une langouste saine dans l'abri. Dans ce cas, les langoustes ne quittaient plus massivement l'abri.

Ainsi, quand les langoustes détectent une congénère infectée, elles sont prêtes à prendre des risques considérables pour éviter la maladie. Cet évitement, bien qu'il ne soit pas sans coût, prévient les épizooties qui, sinon, dévasteraient bel et bien les populations de langoustes, comme Mark Butler et ses collègues l'ont montré à l'aide de modèles mathématiques.

## PROTÉGER LES PLUS PRÉCIEUX ET LES VULNÉRABLES

Les langoustes ne sont pas les seuls animaux chez qui la distanciation sociale présente un rapport bénéfice/coût avantageux. D'autres animaux ont même développé des stratégies pour augmenter ce rapport, en protégeant plus spécifiquement les congénères les plus précieux pour le groupe ou les plus vulnérables.

Les exemples les plus impressionnants se trouvent chez les insectes sociaux, quand les individus exercent des fonctions distinctes et ont de ce fait des influences différentes sur la survie de la colonie.

Dans une étude menée sous la direction de Nathalie Stroeymeyt, de l'université de Bristol, en Grande-Bretagne, et publiée en 2018, les scientifiques ont utilisé de minuscules marqueurs numériques pour suivre les mouvements de fourmis noires des jardins (*Lasius niger*) lors d'une épidémie liée à un champignon mortel nommé *Metarhizium brunneum*. Les spores de ce champignon sont transmises de fourmi en fourmi par contact physique, puis pénètrent au bout d'un jour ou deux dans le corps des insectes, provoquant une maladie souvent létale. La durée qui sépare l'exposition aux spores de l'apparition de la maladie a permis aux chercheurs de voir si les fourmis modifiaient leurs comportements dans les 24 heures qui suivent la détection des premières spores dans la colonie, avant l'apparition des signes de maladie.

Pour ce faire, ils ont appliqué les spores fongiques directement sur un sous-groupe de la colonie, les fourmis fourrageuses, des ouvrières spécialisées dans l'approvisionnement en nourriture. Ces fourrageuses, qui quittent souvent la colonie pour chercher de la nourriture, courent plus de risques que les autres d'entrer en contact avec les spores. Cette approche imite donc la façon naturelle dont le champignon s'introduit dans la fourmilière. >

Les roselins familiers (*Haemorhous mexicanus*) évitent les congénères qui leur semblent mal en point.

Les mandrills (*Mandrillus sphinx*) épouillent leurs parents proches même s'ils ont des parasites, mais évitent les autres congénères infectés.



> Les chercheurs ont ainsi traité 11 fourmilières et ont comparé les réponses comportementales des fourmis à celles d'un nombre équivalent de fourmilières de contrôle où les fourrageuses ont été tamponnées avec une solution stérile et inoffensive (fourrageuses de contrôle).

Après l'application, les fourmis exposées aux spores fongiques ont rapidement mis en place des mesures de distanciation sociale. En

fourrageuses non infectées, mais qui interagissent souvent avec des fourrageuses susceptibles de l'être, se sont, elles aussi, tenues à distance de la colonie. Elles évitaient ainsi le risque de contaminer, par inadvertance, les fourmis s'occupant de la reproduction (la reine et les nourrices qui prennent soin du couvain). Les nourrices aussi ont pris des mesures aussitôt les premières spores détectées dans la colonie: elles ont déménagé le couvain plus loin à l'intérieur du nid, l'éloignant ainsi des fourrageuses.

Finalement, cette stratégie de distanciation sociale s'est révélée si efficace que toutes les reines et la plupart des nourrices des colonies étudiées étaient toujours vivantes à la fin de ces épidémies expérimentales. Les scientifiques cherchent désormais à comprendre comment les fourmis détectent les spores et réagissent si rapidement.

Si les fourmis noires des jardins protègent les individus les plus importants de leur colonie, certains oiseaux adoptent une stratégie différente, qui semble dépendre de leurs propres réponses immunitaires et de leur résistance aux infections.

En 2013, Maxine Zylberberg et deux collègues, de l'université de Californie à Davis, ont mené l'expérience suivante. Ils ont placé des rosélins familiaux (*Haemorhous mexicanus*, des passereaux d'Amérique) dans trois cages adjacentes. L'oiseau de la cage centrale était entouré, d'un côté, d'un congénère en bonne santé et, de l'autre, d'un rosélin qui semblait

## L'attitude des rosélins varie selon l'état de leur propre système immunitaire

24 heures, d'elles-mêmes, elles se sont isolées en passant plus de temps en dehors de la colonie, comparées aux fourrageuses de contrôle.

Dans ces mêmes colonies exposées, les fourmis en bonne santé ont également fortement réduit leurs interactions sociales, mais différemment selon leur fonction. Les



malade (il avait reçu une injection qui l'avait rendu léthargique).

En mesurant le temps que l'oiseau central passait d'un côté ou de l'autre de sa cage, les chercheurs ont montré qu'en général, les rose-lins évitaient le voisin qui semblait malade, mais que cela variait en fonction de l'état de leur propre système immunitaire. Ce dernier était déterminé selon la concentration sanguine en anticorps et en PIT54, une protéine dite «de phase aiguë», qui rend compte de la réactivité du système immunitaire. Les oiseaux dont le système immunitaire était le plus fort étaient ceux qui évitaient le moins leur voisin malade, tandis que les rose-lins qui présentaient un niveau d'immunité inférieur se tenaient plus franchement à l'écart de leur voisin malade.

Un comportement similaire a été observé chez les guppys (ou poissons arc-en-ciel, *Poecilia reticulata*) infectés par un ver contagieux, *Gyrodactylus turnbulli*, qui les affaiblit considérablement. Dans une étude publiée en 2019, Jessica Stephenson, de l'université de Pittsburgh, en Pennsylvanie, a placé des guppys non infectés, un par un, dans un aquarium central flanqué de deux aquariums. L'un était vide et l'autre contenait un groupe de trois guppys.

À chaque fois, le guppy de l'aquarium central a préféré évoluer à proximité des autres guppys, comme on s'y attend chez une espèce sociale. Cependant, certains guppys mâles ont clairement évité le côté de l'aquarium proche des poissons. Ces mâles se sont révélés particulièrement sensibles aux infections par les

vers (plus tard, une fois infectés, ils ont développé un nombre de parasites particulièrement élevé). Les mâles les plus sensibles aux vers réduisent leurs interactions pour éviter d'être infectés. Ainsi, ces deux exemples montrent que l'évolution favorise l'expression de la distanciation sociale chez les individus les plus à risque.

## DES LIENS QUI MODULENT LA DISTANCIATION

Les stratégies de distanciation sociale impliquent parfois de maintenir des liens sociaux quand bien même cela augmente le risque de maladie. Les mandrills, des primates très sociaux, caractérisés par un museau coloré, illustrent ce point. Ils vivent dans les forêts tropicales humides d'Afrique équatoriale, en groupes composés de quelques dizaines à plusieurs centaines d'individus, le plus souvent membres d'une même famille élargie. Ils s'épouillent fréquemment les uns les autres, l'épouillage améliorant l'hygiène et consolidant les liens sociaux. Mais ils adaptent leurs comportements d'épouillage afin d'éviter les congénères contagieux. C'est ce qu'ont démontré en 2017 Clémence Poirotte et ses collègues, du CNRS à Montpellier.

Ces chercheurs ont passé plusieurs mois à observer les interactions quotidiennes d'épouillage de mandrills en milieu naturel dans un parc au Gabon. Ils ont aussi régulièrement prélevé des échantillons de matière fécale afin de déterminer les individus très infestés >

Les mangoustes rayées (*Mungos mungo*), très dépendantes de la coopération, continuent d'épouiller les membres malades de leur groupe.

> par des parasites intestinaux. Ils ont alors montré que les mandrills évitaient soigneusement d'épouiller ces individus les plus infestés (ils sont si infestés que les parasites intestinaux se retrouvent dans leur fourrure). Les biologistes ont également montré que les mandrills parviennent à évaluer le niveau d'infestation en se fiant à leur odorat. Quand on leur présente deux tiges de bambou préalablement mises en contact avec des excréments, ils évitent celle qui a été en contact avec les déjections d'un mandrill très infesté par les parasites.

Cependant, il arrive que les mandrills ne mettent pas la distanciation sociale en pratique malgré les risques de contagion. Ainsi, Clémence Poirotte et Marie Charpentier ont découvert que les mandrills poursuivaient l'épouillage de certains parents proches pourtant très infestés, alors qu'ils se tenaient soigneusement à distance des autres congénères infestés.

Dans leur étude publiée en 2020, elles expliquent que le maintien d'alliances fortes et inconditionnelles avec certains parents peut présenter un certain nombre d'avantages à long terme chez les primates non humains, tout comme chez les humains. Par exemple, chez les mandrills, les femelles qui entretiennent les liens sociaux les plus forts commencent à se reproduire plus tôt et sont donc susceptibles d'avoir des portées plus nombreuses au cours de leur vie. Pour cette espèce, le jeu en vaut la chandelle.

Pour d'autres, les liens sociaux sont si importants qu'il n'y a jamais d'évitement, même quand les individus sont manifestement malades. Par exemple, Bonnie Fairbanks et ses collègues de Virginia Tech, aux États-Unis, ont montré en 2015 que les mangoustes rayées n'évitaient pas leurs congénères même si ces dernières présentaient des signes évidents de maladie.

Les mangoustes rayées constituent une espèce très sociale originaire d'Afrique subsaharienne. Elles vivent en groupes stables pouvant atteindre 40 individus, apparentés ou non. Elles entretiennent de fortes interactions physiques en dormant les unes sur les autres et en s'épouillant, en contrepartie, à tour de rôle.

Dans un premier temps, Kathleen Alexander, coautrice de cette recherche, a constaté que de nombreuses mangoustes de sa zone d'étude, au Botswana, étaient atteintes d'une nouvelle forme de tuberculose qui les tuait en quelques mois. Bonnie Fairbanks a ensuite passé plusieurs mois à suivre six groupes touchés par cette maladie en observant les interactions sociales. Elle a rapporté que, de façon étonnante, les mangoustes en bonne santé ont continué à interagir étroitement avec des congénères visiblement malades. Elles les ont épouillées autant que leurs congénères en bonne santé, même si les mangoustes malades n'étaient pas en mesure de les épouiller autant en retour.

Ainsi, la distanciation sociale avec les malades n'est tout simplement pas viable chez ces mangoustes et chez toutes les espèces où une coopération étroite entre individus pour chasser et se défendre est déterminante.

## SUIVRE L'APPEL DE LA NATURE

Comme les autres animaux, les humains ont une longue histoire d'évolution avec les maladies infectieuses. De nombreuses formes de notre immunité comportementale, comme la sensation de dégoût dans des environnements sales, en résultent probablement.

Mais, contrairement aux autres animaux, les humains d'aujourd'hui disposent de nombreux atouts quand les épidémies frappent à leur porte. Par exemple, nous pouvons désormais nous informer les uns les autres, d'un bout à l'autre de la planète, et en un instant, de toute menace épidémique. Cette capacité nous permet d'instituer une distanciation sociale avant que la maladie n'apparaisse chez nous – une stratégie qui a sauvé de nombreuses vies. Nous disposons de plateformes de communication numérique avancées (courrier électronique, conversations vidéo...) qui nous permettent de garder nos distances physiques tout en maintenant certaines relations sociales. Les autres animaux perdent tout lien social en se mettant à distance.

Mais le plus grand avantage de l'humain est sans doute sa capacité à développer des outils non comportementaux élaborés, tels que les vaccins, qui le protègent de la maladie sans induire d'adaptations comportementales coûteuses. La vaccination permet de maintenir une vie sociale riche et interactive en dépit des maladies contagieuses comme la poliomyélite et la rougeole qui, autrement, nous auraient décimés.

Toutefois, quand il s'agit d'enrayer de nouvelles maladies comme le Covid-19, nous sommes plus ou moins dans le même bateau que les autres animaux. Ici, comme dans la nature, les comportements qui ont fait leurs preuves, tels que la distanciation sociale, demeurent les outils les plus efficaces jusqu'à ce que des vaccins ou des traitements soient développés. Mais à l'instar des autres animaux, nous nous devons d'être stratégiques. Comme les mandrills et les fourmis, nous pouvons maintenir les interactions sociales les plus essentielles, mais rester à distance des personnes les plus vulnérables que nous risquons d'infecter accidentellement. Le succès de la langouste contre le virus dévastateur dans les Caraïbes montre que la distanciation sociale, malgré des coûts élevés à court terme, est rentable à long terme pour la survie de l'espèce. Aussi contre nature que cela puisse paraître, nous n'avons, ici, qu'à suivre l'exemple de la nature. ■

## BIBLIOGRAPHIE

C. Poirotte et M. J. E. Charpentier, **Unconditional care from close maternal kin in the face of parasites**, *Biology Letters*, vol. 16, 20190869, 2020.

J. F. Stephenson, **Parasite-induced plasticity in host social behaviour depends on sex and susceptibility**, *Biology Letters*, vol. 15, 20190557, 2019.

N. Stroeymeyt et al., **Social network plasticity decreases disease transmission in a eusocial insect**, *Science*, vol. 362, pp. 941-945, 2018.

M. J. Butler et al., **Behavioral immunity suppresses an epizootic in Caribbean spiny lobsters**, *PLoS One*, vol. 10(6), e0126374, 2015.

M. Zylberberg et al., **House finches (*Carpodacus mexicanus*) balance investment in behavioural and immunological defences against pathogens**, *Biology Letters*, vol. 9, 20120856, 2013.

J. R. Anderson et D. C. Behringer, **Spatial dynamics in the social lobster *Panulirus argus* in response to diseased conspecifics**, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 474, pp. 191-200, 2013.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

---

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

---

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

**L'ESSENTIEL**

> Les neutrinos existent en trois « saveurs ». Certaines expériences laissent aujourd'hui entrevoir la possibilité d'une quatrième saveur – un neutrino dit « stérile », insensible aux interactions fondamentales autres que la gravitation.

> Si les neutrinos stériles existent, ils pourraient fournir une piste pour aller au-delà du modèle standard de la

physique des particules et pour comprendre le « secteur sombre » de l'Univers, c'est-à-dire la matière noire et l'énergie sombre.

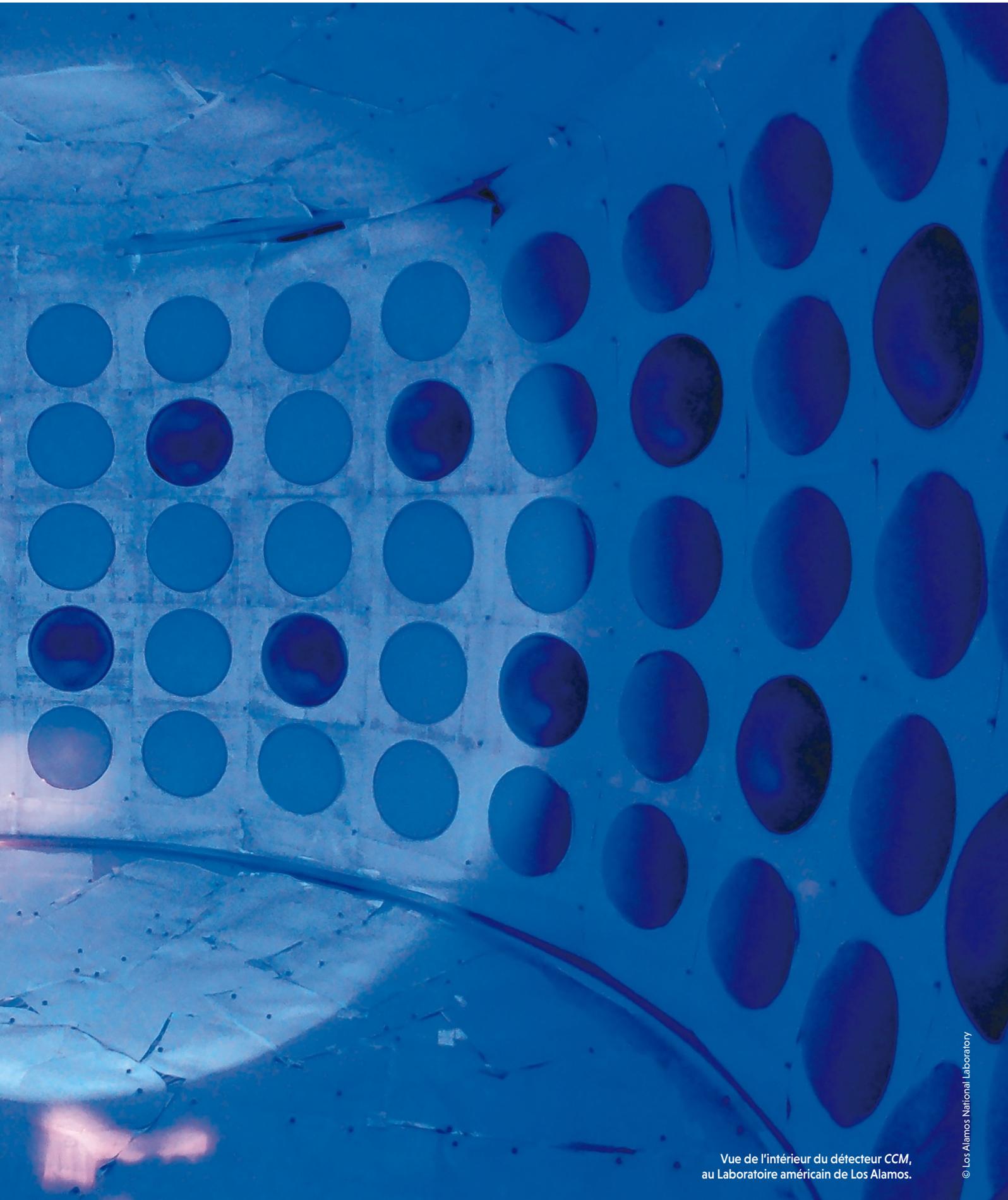
> Plusieurs expériences, notamment avec le détecteur CCM au Laboratoire américain de Los Alamos, sont conçues pour tester l'hypothèse de l'existence de neutrinos stériles.

**LES AUTEURS**

WILLIAM CHARLES LOUIS et RICHARD VAN DE WATER sont physiciens au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis

# À la recherche du neutrino stérile

Les neutrinos existent en trois variétés. Seulement ? Des indices suggèrent l'existence d'une quatrième. Cette hypothétique particule permettra-t-elle d'éclairer la question de la matière noire et de l'énergie sombre ?



Vue de l'intérieur du détecteur CCM,  
au Laboratoire américain de Los Alamos.

© Los Alamos National Laboratory

**L**es physiciens venus assister à notre présentation lors de la Conférence internationale de 2010 sur les neutrinos, à Athènes, s'attendaient sans doute à ce que nous enterrions définitivement les résultats controversés que nous avons annoncés une décennie auparavant. Au lieu de cela, notre prestation fut accueillie par un silence gêné.

L'histoire commence en 1996, lorsque nous publâmes des données obtenues à l'aide du LSND (scintillateur liquide pour la détection des neutrinos) au Laboratoire de Los Alamos. Ces résultats semblaient remettre en question l'assertion largement admise selon laquelle il n'existe que trois types ou « saveurs » de neutrinos – ces minuscules particules omniprésentes qui traversent sans encombre la matière. Les données suggéraient qu'il pourrait exister une quatrième saveur de neutrino encore à détecter. Cependant, une autre expérience similaire menée en Europe, *Karman*, avec une sensibilité comparable, ne révélait rien d'anormal.

La communauté scientifique se montra sceptique et, il faut être juste, les données préliminaires des expériences visant à reproduire nos résultats suggéraient qu'ils étaient erronés, c'est-à-dire qu'il n'y avait finalement pas de quatrième saveur de neutrino. Ce jour-là, à Athènes, l'auditoire s'attendait donc logiquement à ce que nous enfoncions le dernier clou dans le cercueil des faux signaux du LSND. Ce que nous annonçâmes au contraire, c'est qu'avec le temps, les indices en faveur de l'existence de la quatrième saveur de neutrinos sont devenus plus convaincants.

Certes, nous n'avions pas découvert la particule. Mais les travaux que nous présentions, réalisés dans le cadre de l'expérience *MiniBooNE*, au Fermilab de Batavia, dans l'Illinois, suggéraient que quelque chose est erroné dans notre modèle actuel de la physique des particules. Nous affirmions qu'une des solutions les plus vraisemblables était l'existence d'un nouveau neutrino – un neutrino dit « stérile », parce que incapable d'interagir de quelque manière que ce soit avec la matière excepté *via* la gravitation. Au cours des dix ans qui ont suivi notre présentation en Grèce, les données de *MiniBooNE* n'ont fait qu'appuyer davantage les arguments en faveur de cette quatrième saveur de neutrino.

Nous sommes désormais certains d'observer quelque chose qui dépasse le cadre de la physique connue, et les neutrinos stériles figurent parmi les favoris pour l'expliquer. L'idée que nos expériences pourraient être en train de détecter un quatrième neutrino reste cependant controversée, parce que le modèle standard de la physique des particules est l'une des théories les mieux testées et confirmées de

l'histoire... et qu'il n'autorise que trois saveurs de neutrinos.

Cependant, nous savons pertinemment que le modèle standard est incomplet puisqu'il n'explique ni la matière noire ni l'énergie sombre, entités qui semblent pourtant constituer l'essentiel du contenu de l'Univers. Or une nouvelle saveur de neutrino pourrait bien être le chaînon manquant entre la physique connue et ce royaume obscur. Après des décennies d'incertitude, les physiciens mettent enfin sur pied de nouveaux projets expérimentaux, dont notre détecteur *CCM* (ou *Coherent Captain Mills*), grâce auxquels ils résoudreont peut-être le problème.

## LE PLUS FANTOMATIQUE DES NEUTRINOS

Les neutrinos sont des particules fantomatiques. Ils sont ainsi des milliers de milliards à traverser votre corps à chaque seconde, presque à la vitesse de la lumière. Mais le neutrino stérile serait le plus fantomatique de tous. Insensible aux interactions faible, forte et électromagnétique auxquelles sont soumises les autres particules, il serait indétectable. De ce fait, il serait un composant ce que les physiciens nomment le « secteur sombre », auquel appartiennent la matière noire et l'énergie sombre, qui constituent 95% de la densité d'énergie de l'univers. Il se pourrait que les neutrinos stériles soient capables d'interagir avec la matière noire *via* de nouvelles forces de la nature. Ces particules pourraient même être une composante de la matière noire : selon certaines hypothèses, des neutrinos stériles (de



# Ce neutrino est dit «stérile» car il n'interagit pas, sauf via la gravitation

masse cependant supérieure à celle des neutrinos recherchés par *MiniBooNE* et *CCM*) représenteraient une fraction appréciable, voire l'essentiel, de la matière invisible du cosmos.

L'existence des neutrinos stériles ne serait que la dernière d'une longue série de surprises venant de cette intrigante famille de particules. La première date des années 1960, lorsque des

expériences destinées à mesurer le flux de neutrinos émis dans notre direction par le Soleil détectaient systématiquement beaucoup moins de particules que ne le prévoyaient les scientifiques. Toutes les étoiles sont alimentées par des réactions de fusion thermonucléaire au cours desquelles des protons fusionnent et forment des noyaux d'hélium, lesquels fusionnent à leur tour pour former des éléments plus lourds. Les neutrinos électroniques (l'une des trois saveurs de neutrinos, aux côtés des neutrinos muoniques et tauiques) figurent parmi les sous-produits de ces réactions. La théorie permettait de calculer le flux continu de ces particules qui devait atteindre les détecteurs sur Terre. Or on ne détectait qu'une fraction du nombre attendu. C'était le fameux « problème des neutrinos solaires ».

Au départ, beaucoup de physiciens ont supposé que nous comprenions simplement mal le fonctionnement du Soleil. La réalité s'est révélée bien plus simple et nettement plus intéressante. Le Soleil n'émettait pas moins de neutrinos que prévu. C'étaient en fait lesdits neutrinos qui n'arrivaient pas jusqu'à nos

détecteurs sur Terre. Pour être plus exact, ils s'étaient transformés en chemin.

Les physiciens ont fini par comprendre que les neutrinos ne sont pas des entités physiques « pures ». Chaque neutrino est plutôt un mélange des différentes saveurs et il peut passer d'une saveur à l'autre au cours du temps. Ce phénomène appelé « oscillation » fut une surprise pour plusieurs raisons. Pour commencer, le fait que les neutrinos soient susceptibles de changer de saveur implique qu'ils ne sauraient être les particules de masse nulle et voyageant à la vitesse de la lumière que prédit le modèle standard.

Une façon de le comprendre est de se rappeler que, conformément à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, le temps s'écoule plus lentement pour un objet en mouvement que pour un objet immobile. Plus un objet va vite, plus son horloge ralentit (par rapport à une horloge immobile) jusqu'à s'arrêter complètement si l'objet se déplace à la vitesse de la lumière. Cela signifie que si vous pouviez voyager à la vitesse de la lumière, le temps vous paraîtrait s'arrêter et l'Univers se figer sur >

## LES SAVEURS DES NEUTRINOS

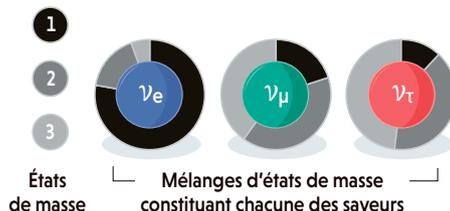
**L**es neutrinos sont des particules élémentaires très surprenantes. Bien que la théorie leur ait attribué une masse nulle, ils se sont révélés dotés d'une masse non nulle, quoique minuscule. Les neutrinos se propagent presque à la vitesse de la lumière et n'interagissent que très rarement avec le reste de la matière. Ces particules insaisissables jouent un rôle crucial dans certaines des questions les plus fondamentales de la physique.

### PROPRIÉTÉS DES NEUTRINOS

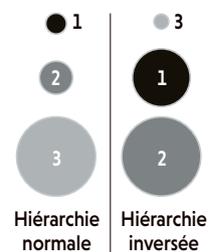
Il existe trois types ou « saveurs » de neutrinos : le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique.



Ces saveurs sont des états constitués en fait d'un mélange de trois « états de masse » possibles.

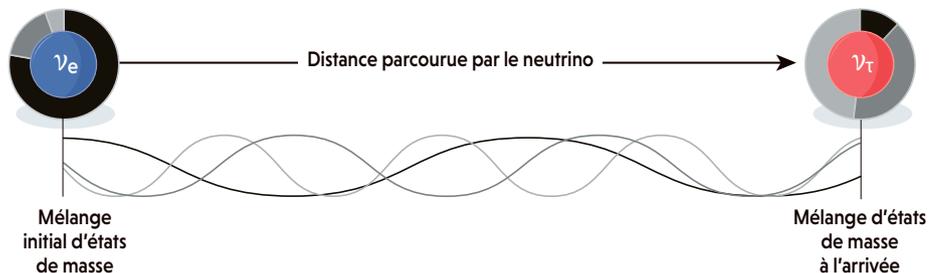


On ne connaît pas encore la valeur exacte de ces trois masses, à part le fait qu'elles sont toutes très petites. La théorie suggère deux possibilités : soit les deux premières sont exceptionnellement faibles et la troisième légèrement plus élevée, soit au contraire l'une est extraordinairement petite et les deux autres un peu plus grandes.



### DES SAVEURS QUI OSCILLENT

Lorsque les neutrinos se déplacent, les différents états de masse qui les constituent se propagent à des vitesses légèrement différentes. Avec le temps, ces écarts modifient le mélange d'états de masse du neutrino et le font donc changer de saveur – un processus nommé « oscillation ». Ainsi, une particule qui démarre sous la forme d'un neutrino électronique peut arriver sous la forme d'un neutrino tauique.



► place. Or si la saveur des neutrinos n'est pas fixe, c'est qu'ils subissent un changement et donc qu'ils ressentent le passage du temps. Ils voyagent donc nécessairement à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière. Par suite, ils ne peuvent pas être dépourvus de masse. Selon la relativité restreinte, les particules de masse nulle voyagent à la vitesse de la lumière: si les neutrinos sont plus lents, c'est qu'ils en ont une, même très faible. Cela signifie aussi que le modèle standard de la physique des particules est à tout le moins incomplet. Cette révélation et la découverte de l'oscillation des neutrinos ont valu le prix Nobel en 2015 au Japonais Takaaki Kajita et au Canadien Arthur McDonald.

## DES SIGNAUX SURPRENANTS

Dans les années 1990 et 2000, nous étudions précisément cette capacité inattendue qu'ont les neutrinos à changer de saveur au sein des expériences *LSND* et *MiniBooNE*. C'est alors que les indices de l'existence d'un neutrino supplémentaire ont commencé à apparaître de façon récurrente. Dans les deux dispositifs, un accélérateur de particules produisait un jet continu de neutrinos muoniques et, dans les deux cas, des détecteurs réglés pour capter des neutrinos électroniques (plus précisément des antineutrinos pour *LSND*) étaient placés à une certaine distance de la source de neutrinos muoniques.

Si vous pouviez voler aux côtés d'un neutrino tandis qu'il file à travers l'espace, vous le verriez «osciller», c'est-à-dire passer par les trois saveurs de façon cyclique. Les saveurs électronique, muonique et tauique seraient toutes les trois observables, du moins en principe. Cependant, si la quatrième saveur stérile existe, votre neutrino pourrait aussi l'adopter. Pour l'observateur qui l'accompagnerait, la particule semblerait simplement disparaître sur un segment de sa trajectoire. Dans le cas le plus simple, le neutrino réapparaîtrait un peu plus loin en retrouvant une des trois saveurs ordinaires (même s'il est théoriquement possible que le neutrino stérile puisse se désintégrer, mettant ainsi fin aux oscillations).

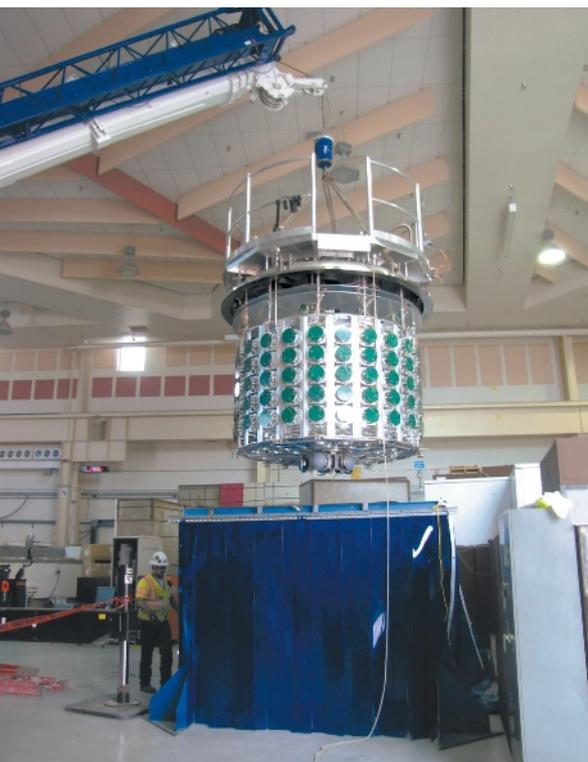
En général, les oscillations d'une des trois saveurs connues à une autre se déroulent sur de longues distances. Mais comme les neutrinos stériles sont très probablement plus lourds que ceux des saveurs habituelles, les particules pourraient osciller vers cet état plus vite et, inversement, en revenir pour adopter l'un des trois types connus sur des distances plus courtes. Ainsi, si les neutrinos stériles existent, leur effet pourrait être d'accélérer le processus d'oscillation et de raccourcir considérablement la distance qu'un neutrino muonique, par exemple, devra parcourir avant de se transformer en neutrino électronique.



C'est exactement ce que nous avons observé lors de nos premières expériences: il semblait que les neutrinos muoniques disparaissaient bien plus vite que prévu au cours de leur voyage depuis la source et que les neutrinos électroniques apparaissaient dans le détecteur en plus grand nombre qu'on ne l'attendait. Nous observions des oscillations sur des distances de quelques centaines de mètres seulement au lieu des quelques centaines de kilomètres prévus. Un nombre aussi élevé de neutrinos muoniques n'auraient pas dû pouvoir se transformer en neutrinos électroniques sur une distance aussi courte que celle de l'expérience, à moins peut-être qu'ils ne se soient changés en autre chose en chemin.

Ces anomalies n'apparaissent pas uniquement dans nos expériences. Les données de certains détecteurs placés à proximité de réacteurs nucléaires (par exemple dans l'expérience franco-allemande *Stereo*, à Grenoble, ou l'expérience *Nucleus*, auprès du réacteur de Chooz, en France) suggèrent également que quelque chose cloche. Tout comme dans le Soleil, les réactions au sein d'un réacteur nucléaire produisent des neutrinos et plusieurs dispositifs expérimentaux ont été placés à leur voisinage pour étudier ces particules. En général, ils détectent moins de neutrinos que prévu, ce qui suggère qu'une partie d'entre eux a pu se changer en neutrinos stériles au cours du trajet depuis le réacteur. Ces résultats sont cependant difficiles à interpréter, car les physiciens ne savent pas exactement combien de

Dans le cadre d'une amélioration du détecteur, Terrance Schaub, chercheur sur l'expérience CCM, soulève un tube photomultiplicateur en vue de le remplacer.



Des techniciens extraient le détecteur de neutrinos CCM hors de son conteneur, qui est rempli d'argon liquide lorsque l'expérience est en cours.

## La détection de neutrinos près d'un réacteur nucléaire présente aussi des anomalies

neutrinos sont produits par un réacteur à fission. La détection d'un plus faible nombre de neutrinos peut donc être due soit à l'existence du neutrino stérile, soit à une surestimation par les scientifiques de la quantité de neutrinos qu'ils devraient détecter.

Des physiciens en Russie contournent cette incertitude avec une expérience nommée DANSS (acronyme anglais pour « détecteur des antineutrinos du réacteur par un scintillateur solide en plastique »). Le dispositif est installé sous un réacteur nucléaire, mais les scientifiques font varier la distance entre le réacteur et le détecteur de neutrinos tous les quelques jours, de façon à vérifier si les neutrinos changent bien de saveur en cours de route. Cette approche est susceptible de révéler aux chercheurs s'il existe des oscillations à courte distance, même s'ils ne disposent pas d'une estimation précise du nombre de neutrinos produits par le réacteur. Par ailleurs, l'expérience franco-allemande *Stereo* teste également les oscillations à courte distance, le détecteur étant distant de 10 mètres seulement du réacteur.

L'énorme observatoire de neutrinos *IceCube*, installé en Antarctique, recherche lui aussi le neutrino stérile. Ce réseau de photodétecteurs enterrés dans la glace polaire et occupant un volume total de 1 kilomètre cube décèle le « rayonnement Tcherenkov », une émission de lumière produite lorsqu'un neutrino très énergétique provenant de la haute atmosphère interagit avec la glace et crée une cascade de particules. L'étude des signaux Tcherenkov

recueillis par les photodétecteurs permet aux scientifiques de reconstituer le type, l'énergie et la trajectoire du neutrino incident.

L'équipe d'*IceCube* devrait bientôt publier une analyse sur les neutrinos qui, sur une période de huit ans, ont atteint ses photodétecteurs en traversant la Terre de part en part. Cette étude recherche les signes d'une disparition des neutrinos muoniques qui, si elle est confirmée, serait cohérente avec les résultats de *LSND* et de *MiniBooNE* et pourrait donc indiquer l'existence du neutrino stérile.

Tous les indices en faveur du neutrino stérile sont certes intrigants et encourageants, mais ils ne permettent pas encore de conclure. La gamme d'énergies des neutrinos étudiés par *IceCube* est large, ce qui complique l'analyse des oscillations. Il est également difficile de distinguer, dans les expériences réalisées à proximité de réacteurs nucléaires, les neutrinos émis par les réactions de ceux issus de désintégrations radioactives au sein du matériel de détection.

Dans les expériences *LSND* et *MiniBooNE*, on peut certes allumer et éteindre l'accélérateur de particules pour déterminer l'intensité du bruit de fond. Mais nous avons été limités en partie par l'impossibilité de chercher les neutrinos à différentes distances de la source. Cela revient à ne prendre qu'une image d'un film, quand il nous faudrait une succession d'images pour connaître toute l'histoire.

### UNE NOUVELLE STRATÉGIE

La nouvelle génération d'expériences en cours ou qui se mettent en place devrait nous permettre d'obtenir la succession d'images dont nous avons besoin. L'idéal, comme nous l'avons évoqué plus haut, serait de pouvoir voler aux côtés d'un neutrino et d'observer ses oscillations. C'est bien sûr impossible, mais ces expériences nous permettent de prendre des instantanés à différents moments de l'oscillation, ce qui est susceptible de faire apparaître la saveur stérile, si elle existe. Parmi ces projets on trouve le programme *Short-Baseline* >

## LES NEUTRINOS EN ACTION

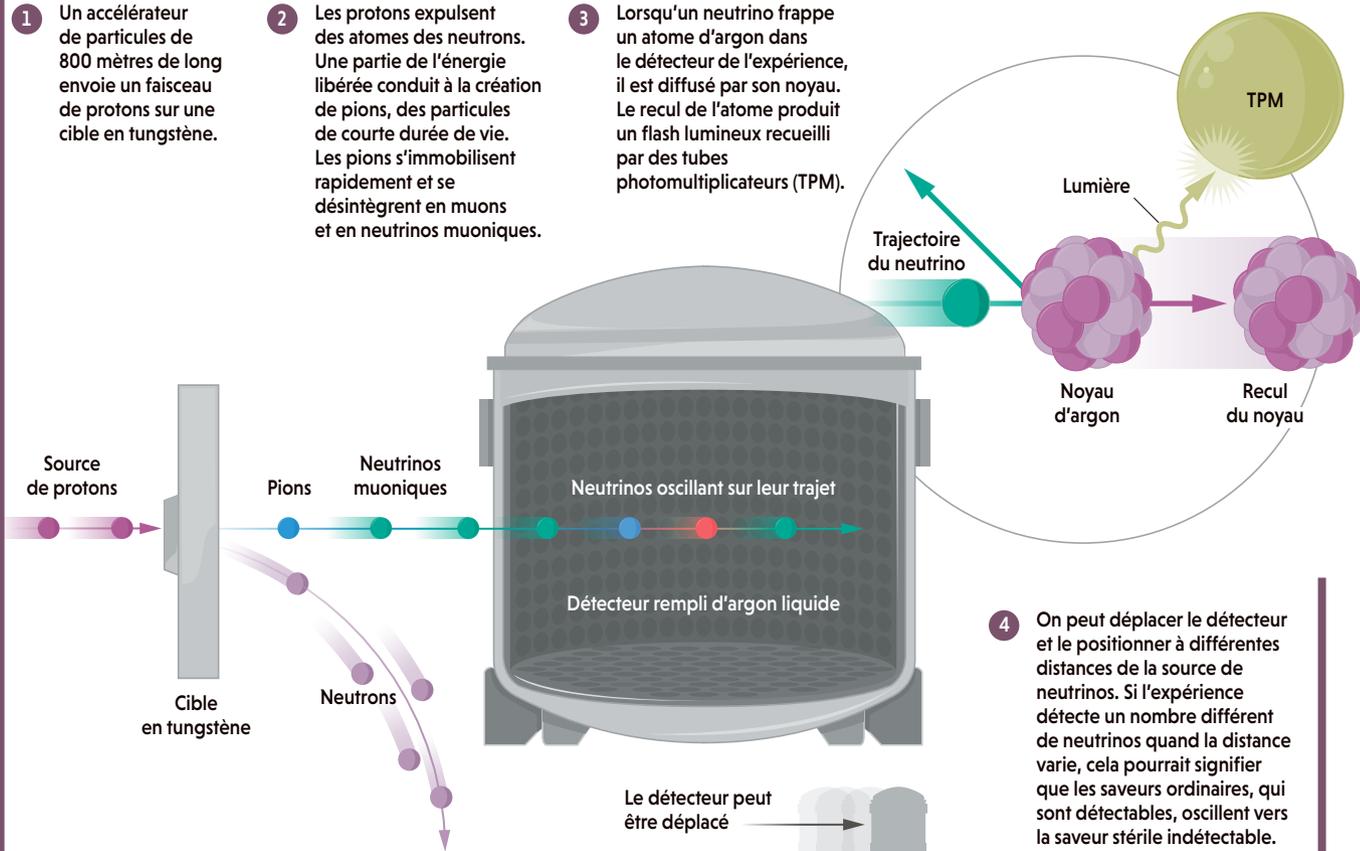
L'expérience CCM (ou *Coherent Captain-Mills*), au Laboratoire américain de Los Alamos, recherche des indices de l'existence d'une quatrième saveur de neutrinos, les neutrinos stériles. Au contraire des trois saveurs connues, qui interagissent peu avec les autres particules, les neutrinos stériles n'interagiraient pas du tout, sauf par le truchement de la gravitation (et du phénomène d'oscillation

d'une saveur à l'autre). Si les neutrinos stériles existent, les neutrinos ordinaires pourraient osciller vers cette forme puis reprendre l'une des trois saveurs connues. L'expérience ne serait pas en mesure de détecter ces neutrinos stériles, mais noterait une diminution du nombre de neutrinos détectés à différentes distances, indiquant ainsi que des neutrinos « normaux » se sont transformés en leur cousin stérile.

1 Un accélérateur de particules de 800 mètres de long envoie un faisceau de protons sur une cible en tungstène.

2 Les protons expulsent des atomes des neutrons. Une partie de l'énergie libérée conduit à la création de pions, des particules de courte durée de vie. Les pions s'immobilisent rapidement et se désintègrent en muons et en neutrinos muoniques.

3 Lorsqu'un neutrino frappe un atome d'argon dans le détecteur de l'expérience, il est diffusé par son noyau. Le recul de l'atome produit un flash lumineux recueilli par des tubes photomultiplicateurs (TPM).



4 On peut déplacer le détecteur et le positionner à différentes distances de la source de neutrinos. Si l'expérience détecte un nombre différent de neutrinos quand la distance varie, cela pourrait signifier que les saveurs ordinaires, qui sont détectables, oscillent vers la saveur stérile indétectable.

> *Neutrino*, au Fermilab, et l'expérience CCM, que nous venons de mettre en route à Los Alamos.

Le dispositif CCM est installé dans le hall du LANSCE, le Centre de science neutronique de Los Alamos, au bout d'un accélérateur de particules de 800 mètres de long. L'accélérateur produit un faisceau de protons qui est dirigé sur une cible en tungstène. En frappant le métal, les protons expulsent de ses atomes des cascades de neutrons selon un mécanisme appelé « spallation ». Une partie de l'énergie libérée par ce processus conduit à la création de particules éphémères, des pions. Ces dernières s'immobilisent et se désintègrent rapidement en un muon et, plus important pour nous, en un neutrino muonique d'une énergie bien déterminée.

CCM détectera ces neutrinos grâce ce que l'on appelle la « diffusion cohérente », qui repose sur le fait que toutes les particules (neutrinos compris) se comportent non seulement comme de petits corpuscules, mais aussi comme des ondes. Cette dualité onde-corpuscule est un des fondements de la mécanique quantique. La longueur d'onde associée à une particule dépend de son énergie. Les particules de haute énergie, très rapides, ont de petites longueurs d'onde, tandis que les particules de faible énergie, lentes, ont de plus grandes longueurs d'onde.

Lorsque des neutrinos de courte longueur d'onde frappent un noyau atomique, ils n'interagissent qu'avec un seul nucléon (proton ou neutron) en son sein. Mais quelque chose de particulier se passe lorsque l'énergie d'un

neutrino est assez basse pour que sa longueur d'onde soit comparable au diamètre du noyau atomique. Au lieu de ne frapper qu'un seul proton ou un seul neutron dans l'atome, le neutrino de faible énergie interagit avec le noyau tout entier. On peut comparer cela à l'arrivée de la houle sur un bateau. Une houle courte

## Faire varier la distance entre le détecteur et la source de neutrinos livrera des indices

n'aura pratiquement aucun effet sur le mouvement d'un très grand navire, alors qu'une houle longue en plein océan le soulèvera considérablement. Puisqu'un neutrino de grande longueur d'onde voit le noyau atomique comme un tout et non comme une collection de petites parties, la probabilité qu'il interagisse est bien plus grande.

Contrairement aux neutrinos de haute énergie, un neutrino de basse énergie rebondit donc sur le noyau tout entier. Cette diffusion est dite «cohérente» parce que la longueur d'onde du neutrino est comparable à la taille du noyau. Le noyau subit alors un recul. Et si cette interaction a lieu dans le matériau adéquat, le recul de l'atome produit un minuscule flash de lumière tandis que le neutrino continue sa route dans une nouvelle direction. En captant le flash lumineux à l'aide d'un détecteur à tubes photomultiplicateurs, on peut déterminer où et quand le neutrino a été diffusé par l'atome ainsi que l'énergie cinétique de ce dernier. Même si la diffusion cohérente ne permet pas de révéler la saveur d'un neutrino donné, elle permet de mesurer le nombre total de neutrinos des trois saveurs qui ont interagi avec le détecteur. Ce point est très important: si cette somme ne correspond pas au nombre de neutrinos attendus, il se peut que des neutrinos stériles indétectés – parce qu'ils ne pourraient pas interagir avec les atomes d'argon et ne produiraient donc pas de flash lumineux – soient impliqués.

Puisque les chances qu'un neutrino soit diffusé par un noyau entier sont supérieures à celles de le voir interagir avec un seul de ses nucléons, on peut se permettre d'utiliser dans ces expériences des détecteurs plus petits que les gros appareillages autrefois nécessaires à la

plupart des détecteurs de neutrinos (il en est de même avec les détecteurs placés près de réacteurs nucléaires, le flux de neutrinos étant alors très intense).

Le détecteur de CCM contient 10 tonnes d'argon liquide, à comparer à la cuve de 800 tonnes d'huile minérale du détecteur de l'expérience MiniBooNE. Et comme il est compact, on peut le déplacer d'un endroit à un autre afin de détecter les neutrinos à différentes distances de leur source. Si les neutrinos oscillent assez fréquemment sur les quelques dizaines de mètres disponibles dans le hall d'expériences du Lansce, nous observerons une variation du nombre total de détections en fonction de la distance. Un tel résultat indiquerait qu'il se produit effectivement des oscillations vers la saveur stérile: en effet, s'il n'existe que trois saveurs seulement, nous ne devrions pas observer d'oscillation sur de si courtes distances.

### DES CONTRAINTES SUR LES PARAMÈTRES

Il est bien sûr possible que CCM ne décèle rien de tel. Dans ce cas, le nombre de neutrinos normaux observé diminuera simplement à mesure que nous éloignerons le détecteur de la cible en tungstène, exactement comme l'éclat apparent d'une lampe diminue à mesure que l'on s'en éloigne.

Bien que décevant, un tel résultat n'exclurait pas l'existence d'un ou plusieurs neutrinos stériles, mais il permettrait de fixer des limites à leurs propriétés potentielles. Comme les oscillations des neutrinos dépendent de leurs masses relatives et d'un paramètre nommé «angle de mélange», le fait de ne pas trouver de signe du neutrino stérile nous permettra de mettre le doigt sur les valeurs que ces masses et ces angles de mélange ne peuvent en aucun cas avoir, réduisant ainsi la plage de paramètres que les chercheurs devront considérer.

Les expérimentateurs qui présentent des résultats en désaccord avec le modèle standard sont présumés coupables jusqu'à ce qu'ils prouvent leur innocence, pour la bonne raison que, historiquement, les scientifiques qui ont remis en cause le modèle standard ont eu tort. Il est cependant certain qu'il existe une physique au-delà du modèle standard. À elle seule, l'oscillation des neutrinos en est une preuve.

La recherche sur les neutrinos a régulièrement stimulé des développements novateurs en physique depuis les tout premiers neutrinos découverts en 1956 par Frederick Reines et Clyde Cowan, nos prédécesseurs au laboratoire de Los Alamos. Si les neutrinos stériles restent un sujet controversé vingt-cinq ans après que nous avons décelé les premiers indices de leur existence, les nouvelles expériences sont désormais sur le point de résoudre le problème – d'une façon ou d'une autre. ■

### BIBLIOGRAPHIE

S. V. Demidov et al., **Bounds of non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data**, *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020(3), article 105, 2020.

A. A. Aguilar-Arevalo et al., **Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment**, *Physical Review Letters*, vol. 121(22), article 221801, 2018.

M. Hirsch et al., **Les neutrinos, une porte vers l'inconnu**, *Dossier Pour la Science* n° 85, pp. 70-77, octobre-décembre 2014.

Restes d'enfants âgés de moins de 15 ans qui ont été sacrifiés au xv<sup>e</sup> siècle dans le cadre d'un rituel chimú, sur le site de Huanchaquito-Las Llamas.



**L'ESSENTIEL**

> Dans le désert nord péruvien d'avant la conquête espagnole, les Chimús sacrifiaient en masse des enfants et de jeunes lamas face à l'océan Pacifique.

> Cette pratique rituelle se rattache à celles des autres cultures américaines de l'époque, mais se caractérise par l'importance centrale que les prêtres chimús accordaient à l'arrachement du cœur.

> Le sacrifice de masse dont les traces ont été mises au jour sur le site de Huanchaquito-Las Llamas était vraisemblablement destiné à apaiser la colère des dieux, traduite par un épisode climatique El Niño.

> Les sacrifices humains servaient probablement aussi à asseoir le pouvoir des élites dirigeantes sur la société chimú.

**L'AUTEUR**



**NICOLAS GOEPFERT**  
chargé de recherche du CNRS au laboratoire Archéologie des Amériques (CNRS-université Paris 1-Panthéon-Sorbonne), installé à la MSH Mondes, à Nanterre



# Les enfants sacrifiés sur l'autel... d'El Niño?

Au nord du Pérou, sur la côte Pacifique, les archéologues ont mis au jour les traces d'un sacrifice pratiqué il y a plus de cinq siècles, dont les centaines de victimes étaient des enfants et de jeunes lamas. Une macabre cérémonie probablement motivée par des troubles météorologiques.

C'était au xv<sup>e</sup> siècle, quelque part sur la côte nord du Pérou. Des dizaines d'enfants et de jeunes lamas attendaient sur une dune de sable à 300 mètres de l'océan Pacifique. Sans doute ignoraient-ils qu'ils étaient là pour être mis à mort au cours d'un rituel qui produira le plus grand sacrifice d'enfants et d'animaux connu.

Cinq siècles plus tard, près du petit port de Huanchaquito, à 10 kilomètres de la ville péruvienne de Trujillo, l'équipe de Gabriel Prieto, de l'université Yale, et de John Verano, de l'université Tulane (Louisiane), dont je fais partie, remet leurs corps à la lumière du jour et fait une constatation étrange: tous les cœurs des enfants et des lamas ont été extraits! Aujourd'hui, le site de Huanchaquito-Las Llamas nous fournit un témoignage spectaculaire sur les sacrifices effectués par l'une des sociétés préhispaniques du nord du Pérou: les Chimús. Et l'enquête anthropologique qui en a découlé nous révèle que ces rites répondent à une logique somme toute commune...

## LES CHIMÚS, UN PEUPLE DU DÉSERT

Qui étaient les Chimús, ce peuple du désert nord péruvien? Entre 900 et 1470 de notre ère, ils ont succédé aux Mochicas sur un territoire qui, à leur apogée, s'étendait sur près de 1000 kilomètres entre la frontière sud de l'actuel Équateur et la vallée de Chillón aux abords de Lima, la capitale du Pérou (voir l'encadré page ci-contre). À l'instar des peuples qui les avaient précédés, les Chimús vivaient au sein d'un environnement désertique et des vallées fertiles arrivant des Andes. Ils contrôlaient leur territoire grâce à de grands centres administratifs – notamment Farfán, dans la vallée de Jequetepeque, et Manchán, dans celle de Casma – et de tout un réseau de centres secondaires rattachés.

Comme les Chimús n'avaient pas d'écriture, les premiers témoignages historiques sur leur société nous viennent des chroniqueurs espagnols. Même s'ils s'intéressaient principalement aux Incas, de nombreux auteurs des xvi<sup>e</sup>-xvii<sup>e</sup> siècles tels que Miguel Cabello de Balboa, Fray Martin de Murúa, Pedro Cieza de León et Inca Garcilaso de la Vega ont en effet livré des fragments de l'histoire chimú, mais en s'attardant surtout sur les conditions de la conquête inca.

Heureusement, *La Historia anónima de Trujillo*, un texte anonyme de 1604, nous apporte des informations plus détaillées, les seules dont nous disposons sur l'origine des Chimús. Nous y apprenons qu'un ancêtre nommé Tacaynamo se serait installé dans la vallée de Moche et aurait fondé Chan Chan, qui

deviendra la capitale chimú. Au gré des conquêtes vers le nord (Lambayeque) et le sud (Casma), ses fils auraient peu à peu affermi leur pouvoir et bâti l'un des plus importants empires préhispaniques. Aux alentours de 1470, l'empereur Tupac Yupanqui conquiert l'empire chimú et l'intègre à l'empire inca. La chronique nous révèle en outre que les vainqueurs exilent Minchancaman, le dernier souverain chimú, à Cuzco, leur capitale, et repartent de Chan Chan avec de fabuleux trésors d'or et d'argent, mais aussi avec des métallurgistes et des orfèvres, qui contribueront à la culture matérielle inca.

Le mode de vie chimú s'est principalement développé dans le désert de la côte et les vallées oasis qui le traversent toutes les cinquantaines de kilomètres. Ils ont su s'adapter à cet environnement difficile en développant l'agriculture et l'élevage en milieu désertique. Les Chimús ont ainsi construit de nombreux

# Aux alentours de 1470, le souverain inca Tupac Yupanqui mit fin à l'empire chimú

Les Chimús organisaient leurs champs afin d'économiser l'eau. Des enroulements réguliers de sillons le long desquels étaient plantés les végétaux cultivés permettaient de faire circuler l'eau dans tout le champ en optimisant son absorption près des racines et en minimisant son évaporation.

canaux afin d'irriguer des terres auparavant inexploitable. Grands ingénieurs, ils maîtrisaient le tracé, la pente et les revêtements nécessaires à l'écoulement maîtrisé de l'eau prise en amont de petits fleuves côtiers, tels les ríos Moche ou Chicama. Longs parfois de plusieurs kilomètres, ces canaux pouvaient mesurer plusieurs mètres de large et 1 à 2 mètres de profondeur. Ils forment l'un des plus puissants >



## L'EMPIRE, LA CAPITALE, LES BUREAUCRATES ET LES ARTISANS CHIMÚS

L'empire chimú s'étendait sur la côte nord du Pérou actuel, une région essentiellement désertique (voir la carte ci-contre) correspondant en grande partie au territoire de leurs prédécesseurs mochicas. Le centre politique, administratif et religieux des Chimús était Chan Chan, qui s'étendait sur plus de 20 kilomètres carrés et formait l'un des plus imposants complexes urbains de l'Amérique préhispanique. L'importance de la main-d'œuvre et de l'organisation qui furent nécessaires pour construire une telle capitale ainsi que le très grand réseau d'irrigation du territoire chimú prouvent l'existence d'un pouvoir très centralisé et très coercitif, celui-là même qui était capable d'ordonner et d'organiser de grands sacrifices d'enfants et de lamas.

La structuration interne de la capitale indique une forte hiérarchisation sociale et politique, au sein d'un système à quatre niveaux hiérarchiques. La vie administrative et religieuse se déroulait au sein de ce que les premiers voyageurs du <sup>XIX</sup><sup>e</sup> siècle nommèrent des *ciudadelas* (« citadelles »), protégées par des murs en adobe de 9 mètres de haut, et formant le cœur de la cité. Celui-ci est entouré de quartiers artisanaux et d'habitats, mais aussi de plusieurs pyramides à degrés, les *huacas*, dont la structure rappelle

celles que l'on connaît chez les Mochicas. Tous ces édifices furent construits à l'aide de millions d'adobes, ces briques crues séchées au soleil, qui ont depuis souffert de l'érosion et des intempéries (voir la photo ci-dessous).

En quingnam, la langue parlée par les Chimús, Chan signifierait « Soleil » ou « Lune », en référence peut-être aux divinités majeures du panthéon chimú. Cette langue, dont la conquête espagnole précipita l'extinction, était proche de celle des Mochicas, le muchik. Ainsi, outre le quingnam, le muchik et divers dialectes étaient parlés par les habitants de l'empire.

Les Chimús étaient constitués en divers groupes sociaux comprenant des agriculteurs, des éleveurs, des pêcheurs, des artisans (dont des bâtisseurs), des prêtres et des guerriers. À propos des deux derniers groupes, on utilise parfois le terme de « prêtre-guerrier », tant il est difficile de distinguer les deux. La plupart des habitants vivant dans les quartiers autour des *ciudadelas* étaient des artisans, femmes ou hommes, qui y vivaient répartis par spécialités.

### La capitale Chan Chan s'étendait sur plus de 20 kilomètres carrés

Les tisserands produisaient ainsi des vêtements en coton et en laine de camélidé (alpaga et lama). Ces vêtements comprenaient des pagnes, des chemises sans manches, des *unkus* (sorte de ponchos) et des tuniques. L'art de la plume était aussi très développé pour les coiffes. Les céramiques représentaient de nombreux animaux, fruits ou divinités et comportaient souvent une



Le territoire chimú s'étendait au nord de Lima sur la côte désertique du nord du Pérou. Lors de la conquête espagnole, la ville de Trujillo fut fondée non loin de Chan Chan, ce qui priva définitivement l'ancienne capitale chimú de toute importance.

petite application en forme de singe à la jonction du col et de l'anse. Tandis que la poterie domestique était sommaire, les poteries rituelles, notamment funéraires, étaient beaucoup plus élaborées.

Les artisans métallurgistes chimús avaient atteint un grand savoir-faire du travail de l'or, de l'argent et des alliages cuivrés, qui poussera les Incas à les employer. Ils étaient spécialisés et pratiquaient le martelage, la dorure, l'estampage, le moulage à la cire perdue, le filigrane, etc. Ils produisaient des couronnes, des diadèmes, des pectoraux, des récipients ornés, des figurines animales, des bracelets, des bijoux, des couteaux, etc.



Cette vue de l'un des bâtiments de Chan Chan traduit l'art élaboré de la construction en adobe des Chimús.



> réseaux hydrauliques connus en milieu désertique. Les champs prenaient plusieurs formes, selon la disposition des sillons sinueux qui les irriguaient (voir la photo page 58). Grâce à leurs réseaux hydrauliques, les Chimús ont pu cultiver à grande échelle du maïs, des courges et des haricots, récolter des avocats et de nombreux autres fruits et légumes.

Par ailleurs, ils élevaient, outre des cochons d'Inde, des lamas et des alpagas. Ces derniers sont des camélidés domestiques, dont les ancêtres sauvages vivaient dans les Andes. Malgré la faible abondance de la végétation côtière, les Chimús parvenaient à les élever dans les basses-terres grâce à la culture du maïs, qui rendait possible un affouragement abondant (elle fournissait jusqu'à 70% de l'alimentation des bêtes). Lamas et alpagas représentaient près de 95% des apports en protéines des populations chimús et servaient aussi de bêtes de somme, ce qui favorisait les échanges à longue distance avec les autres zones de l'aire andine et possiblement avec l'Amazonie.

Ainsi, les Chimús savaient se procurer des aliments, des matières premières et des biens

de prestige dans des régions situées bien au-delà des frontières de leur empire. Il est donc clair qu'on ne peut les comprendre sans tenir compte des cultures qui les environnaient, ce qui s'applique aussi à leurs sacrifices humains...

### DES SACRIFICES POUR CALMER LES DIVINITÉS

Les sacrifices humains des Chimús nous sont connus par deux sites archéologiques, tous deux localisés sur le littoral et à 2 kilomètres l'un de l'autre : Pampa la Cruz et Huanchaquito-Las Llamas. Connus depuis des décennies, Pampa la Cruz est l'objet de fouilles depuis les années 1970, tant la longue occupation du site – depuis 400 avant notre ère jusque vers 750 – le rend intéressant. En 2016, Gabriel Prieto reprit les fouilles et mit en évidence un important établissement chimú. Parmi les vestiges se trouvaient les restes de 227 humains et de 400 camélidés sacrifiés en plusieurs fois.

La découverte du site de Huanchaquito-Las Llamas est au contraire récente et fortuite : dénué d'architecture, le site ne laissait rien apparaître, jusqu'à un jour de mars 2011 où un habitant du coin aperçut des ossements

Un enfant et un lama ont été inhumés ensemble, le lama reposant sur la partie supérieure gauche de l'individu humain.



Un sacrifice de lama avec extraction du cœur par des villageois andins, de nos jours.

humains, des cheveux, des fibres animales visibles en grande quantité dans le profil de la dune. Il alerta Gabriel Prieto, qui saisit tout de suite l'importance de la découverte et obtint l'aide du ministère péruvien de la Culture pour une première fouille de sauvetage. Deux fouilles programmées suivirent en 2014 et 2016, qui aboutirent à la mise au jour de 140 individus

petits groupes. Les archéologues regroupent toutefois ces dépôts en au moins quatre événements sacrificiels de masse. Dans le cas de Huanchaquito-Las Llamas, au contraire, nous avons affaire à un seul sacrifice de masse réalisé aux environs de 1400-1450 de notre ère. Les sacrificateurs ont inhumé les enfants et les llamas au sein de nombreuses fosses proches les unes des autres, qu'un même sable éolien a ensuite recouvert (voir la photo pages 56-57). Dans plusieurs dépôts, un enfant et un lama sont même inhumés ensemble (voir la photo page 60).

Au total, les deux sites rassemblent près de 367 individus humains et plus de 600 camélidés sacrifiés. Les mêmes techniques de sacrifice y ont été employées. L'étude réalisée par John Verano révèle que tous les enfants inhumés présentaient des traces de découpe sur le sternum et les côtes, et nombre d'entre eux avaient la cage thoracique ouverte, afin de faciliter l'extraction du cœur. Étaient-ils vivants au moment de l'ouverture de leur poitrine? Difficile à dire, de même qu'il est impossible de savoir si on leur avait fait prendre des produits psychotropes.

Pour ma part, j'ai observé que les animaux inhumés à leur côté présentaient des traces similaires, lesquelles signent une technique sacrificielle andine caractéristique: la *ch'illa*. Elle consiste à insérer la main et l'avant-bras dans la poitrine de l'animal vivant afin de saisir le cœur puis de l'extraire. Pratiquée à plusieurs époques par de nombreux groupes, la *ch'illa* est caractéristique des hautes terres andines, et non pas d'une culture spécifique. >

## C'est le plus grand sacrifice de masse d'enfants et d'animaux que l'on connaisse

(137 enfants âgés de 4 à 15 ans et 3 adultes) et de 206 camélidés, mis à mort apparemment en une fois, ce qui fait de Huanchaquito-Las Llamas le plus grand sacrifice de masse d'enfants et d'animaux connu.

Ainsi, ce sont des activités sacrificielles différentes que traduisent les deux sites. À Pampa la Cruz, plusieurs dizaines de dépôts s'étalent sur près de 400 ans (1100-1532 en englobant la période inca). Les enfants et animaux ont été inhumés séparément, chacun de leur côté et par

► Elle est, du reste, toujours pratiquée sur les lamas et alpagas par plusieurs communautés des Andes du Sud (voir la photo page 61). Il ne s'agit donc pas d'un trait culturel spécifique aux chimús, mais plutôt de la technique de mise à mort préférée à l'époque préhispanique. Rien d'étonnant donc à ce qu'on la retrouve à Pampa la Cruz et à Huanchaquito-Las Llamas. Son utilisation ne nous informe donc guère sur les motivations des Chimús.

Comment les victimes des sacrifices étaient-elles sélectionnées? Les analyses d'ADN effectuées sur un échantillon réduit par Lars Fehren-Schmitz, de l'université de Californie à Santa Cruz, montrent qu'il s'agissait à la fois de garçons et de filles. Le sexe ne semble donc pas avoir joué de rôle. Sinon, il est manifeste que les prêtres ont privilégié de jeunes individus: on a d'un côté des enfants âgés de 4 à 15 ans et de l'autre de jeunes lamas pour la plupart âgés de moins d'un an. L'étude des crânes des enfants révèle l'existence de déformations volontaires, pratique courante à l'époque préhispanique, mais qui indiquerait ici une origine montagnaise (et non côtière) de certains individus. Les analyses isotopiques, qui ont révélé différentes alimentations, le confirment. Les enfants semblent donc venir de différentes régions de l'empire chimú, comme s'ils constituaient un tribut payé à l'élite gouvernante par des populations sous domination.

La situation est différente pour les animaux: tous proviennent de la côte ou des vallées moyennes, en d'autres termes des environs. Élise Dufour, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, a réalisé des analyses isotopiques notamment afin de tenter de déterminer si les jeunes lamas ont été élevés ensemble. Ces analyses indiquent qu'ils étaient issus de troupeaux différents, ce qui contredit la description des chroniqueurs pour la période inca, selon lesquels les animaux réservés aux rituels provenaient d'élevages spécialisés.

Par ailleurs, Matthieu Le Bailly, de l'université Bourgogne-Franche-Comté a réalisé des analyses sur les contenus intestinaux des camélidés, qui ont montré que certains animaux étaient infestés par des parasites, dont certains potentiellement mortels. Cette observation nuance les observations ethnographiques actuelles, dans lesquelles on rapporte fréquemment que l'animal de sacrifice est le plus sain et le plus beau du troupeau. Ici, bien que nous ignorions si des symptômes externes étaient visibles, les officiants ont aussi sacrifié des animaux malades.

Autre point: la recherche d'amidons sur ces mêmes contenus intestinaux menée par Clarissa Cagnato, du laboratoire Archéologie des Amériques, à Nanterre, a permis de caractériser le dernier repas des camélidés et



Ces traces de pas indiquent que les prêtres ont dû faire attendre les enfants et les lamas ensemble dans la boue; c'est là une autre preuve de la simultanéité des sacrifices.



## Les enfants sacrifiés semblent issus de différentes régions de l'empire chimú

d'identifier des espèces végétales comme le maïs, le manioc ou le piment. La présence de ces deux dernières espèces surprend un peu, car elles ne font pas habituellement partie de la nourriture des animaux.

Enfin, les jeunes lamas étaient choisis selon leur pelage, avec une préférence pour les animaux à robe beige, marron ou mélangeant ces deux couleurs; aucun lama blanc, gris ou noir n'a été découvert, ce qui suggère que certaines couleurs avaient plus de valeur symbolique que d'autres.

### UNE PRATIQUE RITUELLE CENTRALE DANS LES AMÉRIQUES

Maintenant que nous avons rassemblé les faits constatés à Pampa la Cruz et à Huanchaquito-Las Llamas, prenons du recul et tentons de placer les sacrifices chimús dans leur contexte anthropologique. Une première réaction peut être de juger extraordinaires de tels sacrifices humains. Qui peut être assez cruel,

se demande-t-on, pour sacrifier ses propres enfants? Qui? À peu près tout le monde, puisque les habitants du village néolithique de Çatalhöyük (Turquie) en sacrifiaient, mais aussi les Canaanéens (culte de Moloch), les Carthaginois, les Gaulois, les anciens peuples mésoaméricains et d'Amérique du Nord, les Hakkas (une population chinoise), etc.

Bref, le sacrifice humain semble bien avoir été pratiqué sur toute la planète. Pourquoi? Avant tout «pour apaiser les dieux», écrivait sèchement Cicéron au 1<sup>er</sup> siècle avant notre ère, tant cela lui paraissait évident. Dans de nombreuses cultures, l'offrande de vies humaines, et d'abord celles de prisonniers de guerre, de condamnés ou d'esclaves était communément considérée comme plus efficace, celle d'enfants étant suprêmement efficace. Cette idée était si commune dans le passé qu'elle reste sans doute à l'état latent dans nos cultures, puisque nous lisons dans la Bible qu'Abraham a failli sacrifier son fils Isaac... Dès lors, on s'interroge: si cette application particulière du principe religieux fondamental qu'est le sacrifice humain était si commune dans le passé, était-il aussi répandu dans les Amériques et les Andes?

## LE SACRIFICE HUMAIN, PHÉNOMÈNE PANAMÉRICAIN?

La réponse est: très largement! Les Mayas et les Mexicas (les Aztèques) le pratiquaient massivement, et, similitude avec notre cas d'étude, en extrayant le cœur. Ainsi, au Mexique, à 50 kilomètres de la capitale, les spectaculaires dépôts de la pyramide de la Lune à Teotihuacán, datés entre 200 et 350 de notre ère, associent des victimes sacrificielles humaines et des animaux sauvages (aigles, loups, coyotes). Les dépôts du Templo Mayor à Tenochtitlán, l'ancienne capitale aztèque (aujourd'hui Mexico), révèlent quant à elles de nombreux sacrifices humains (enfants et adultes) et plus de quatre-vingts espèces animales...

D'après les chroniqueurs espagnols, les Incas pratiquaient aussi de nombreux rituels sacrificiels de masse, soit cycliques et suivant un calendrier rituel bien défini, soit ponctuels, lors de la mort d'un empereur par exemple. Des cérémonies comprenant plusieurs centaines de victimes et des holocaustes (sacrifices par le feu) de grande ampleur ont été décrites, sans que les archéologues aient pour l'instant découvert de tels contextes. Il y a aussi la *capacocha*, le sacrifice de jeunes enfants et leur inhumation dans des sanctuaires de haute montagne. Leurs momies ont par exemple été retrouvées sur le volcan Lullallaco, en Argentine, mais aussi sur des sites péruviens et chiliens.

Contemporains des Chimús, les Lambayeques pratiquaient également le



Ce dépôt est typique: l'enfant sacrifié a été déposé dans une fosse sur le dos, les jambes repliées sur la poitrine et la cage thoracique ouverte.

sacrifice humain, comme en témoignent les 81 squelettes découverts sur le site de Cerrillos en 900-1100 de notre ère par les archéologues péruviens Jorge Centurión et Manuel Curo et analysés par Haagen Klaus, de l'université George Mason, en Virginie.

Sur la côte nord du Pérou, les prédécesseurs des Chimús – les Mochicas – avaient fait de l'acte sacrificiel le rituel le plus important de leur religion. Leur divinité principale est un dieu représenté sous différentes formes (on lui connaît 15 avatars) avec une tête coupée dans une main et un *tumi*, c'est-à-dire un couteau sacrificiel, dans l'autre.

Pas seulement andin, le sacrifice humain est donc un rituel que l'on retrouve dans l'ensemble des Amériques et, notons-le bien, l'extraction du cœur est largement présente aussi. Le recrutement des sacrifiés variait d'une société à l'autre – des adultes chez les Mochicas, des enfants chez les Chimús –, mais dans les Andes comme dans le reste du monde, il s'agissait toujours d'influencer les dieux.

À Huanchaquito-Las Llamas, comme nous l'avons vu, les victimes sacrificielles venaient de différentes parties du territoire contrôlé par >

> les Chimús, aussi bien de la côte que de la montagne. On peut dès lors supposer que dans le cadre religieux du sacrifice humain, les enfants envoyés constituaient aussi une sorte de tribut fourni au souverain. Probablement, cela constituait aussi pour le dirigeant un moyen coercitif de contrôler les populations en leur inspirant de la terreur. Les formes d'organisation politique variaient à travers les Amériques – cité-État chez les Mayas, empire chez les Aztèques et les Incas, royauté chez les Chimús... –, mais dans tous ces cas, le sacrifice avait pour effet de renforcer le pouvoir de l'élite gouvernante sur le peuple au sein de sociétés très hiérarchisées.

Si elle est souvent figurée dans les Andes et en Mésoamérique, chez les Chimús, l'extraction du cœur constitue clairement l'objectif principal du rituel sacrificiel. Pratique panandine, voire panaméricaine, le sacrifice humain était pour les élites chimús une sorte de norme, qui semble avoir donné sa véritable force symbolique aux offrandes faites aux dieux. Aucun site archéologique américain n'illustre en effet avec force la fréquence de sa pratique que ceux de Huanchaquito-Las Llamas et Pampa la Cruz; aucun ne rend aussi évidente la proximité des Chimús avec leurs animaux domestiques, puisque à Huanchaquito-Las Llamas, on les a sacrifiés ensemble et de la même façon, puis inhumés ensemble (voir la photo page 60).

## UNE CÉRÉMONIE LIÉE À UN ÉPISODE CLIMATIQUE EL NIÑO?

La côte de Huanchaco était manifestement un lieu singulier pour les prêtres chimús, puisque, plutôt que de pratiquer leurs rites dans leur capitale Chan Chan, ils préféreraient venir sur ce bout de littoral océanique. Peut-être était-il sacré? Quoi qu'il en ait été, ils y développaient ce que l'on pourrait appeler un vaste «programme sacrificiel», ce qui s'illustre particulièrement dans le site de Pampa la Cruz. Là, les sacrifices ne semblent pas avoir été effectués en réponse à un événement ponctuel, mais au contraire au cours de rituels réguliers, voire cycliques.

Dans le cas de Huanchaquito-Las Llamas, en revanche, nous avons affaire à un sacrifice de masse répondant à une nécessité singulière. Laquelle? Le cas d'un autre sacrifice découvert dans les années 1990 par Steve Bourget, aujourd'hui au musée du quai Branly, à Paris, fournit un indice: au sommet de la Huaca de la Luna, une pyramide à degrés qui fut l'un des plus importants sites religieux de la culture mochica, il a été découvert les corps de près de quatre-vingts victimes sacrificielles, et confirmé archéologiquement à cette occasion que l'ensemble des représentations connues sur céramique, sur métal ou sur les frises ornant les murs des pyramides disaient vrai: chez les

prédécesseurs des Chimús, on sacrifiait bien des humains. Or d'après les sédiments dans lesquels on les a trouvés, les victimes, des guerriers probablement, furent mises à mort lors d'un événement El Niño de forte amplitude au VI<sup>e</sup> siècle de notre ère.

El Niño? Ce nom, qui fait allusion à l'enfant Jésus dans sa crèche parce que ce phénomène climatique se déclenche en décembre, est une anomalie positive de la température (elle augmente) de l'océan et une perturbation de la circulation des alizés, qui, dans l'océan Pacifique, a notamment pour effet de déplacer vers l'est les zones de précipitation. Pour les pays de la façade andine, ses conséquences sont catastrophiques: comme les montagnes arrêtent les nuages, l'arrivée d'énormes précipitations entraîne un ruissellement et des inondations dévastatrices pour les champs, les installations humaines et les paysages.

C'est particulièrement vrai dans le désert de la côte nord du Pérou: dans ce milieu habituellement sevré d'eau, les précipitations massives entraînent des glissements de terrain en série nommés *huaycos*. Au Pérou, El Niño est depuis toujours une plaie: en 1925, par exemple, la ville de Trujillo, près de Huanchaco, fut partiellement détruite; en mars 2017, selon un bilan publié par l'Institut péruvien de défense civile, il avait fait 162 victimes, 500 blessés et 100 000 sinistrés. Étant donné l'ampleur des dépôts sédimentologiques de chaque El Niño, les occurrences de ces épisodes sont aisément repérables par les géomorphologues.

Or à Huanchaquito-Las Llamas, un indice suggère que le sacrifice a fort bien pu se dérouler pendant un épisode El Niño: nous avons en effet trouvé sur le site une épaisse couche de boue séchée typique du phénomène. Détail particulièrement touchant, des dizaines d'empreintes de pieds humains et de sandales, ainsi que des pas de lamas et de chiens y sont inscrites: on a fait attendre les futurs sacrifiés dans la boue (voir la photo page 62). Il est difficile de donner une chronologie précise à ce grand sacrifice, mais on peut estimer à plusieurs jours, voire à plusieurs semaines, le temps sur lequel des enfants et des lamas furent emmenés en masse pour être mis à mort. Le temps, se dit-on, que les prêtres ont estimé nécessaire afin d'obtenir des dieux qu'ils calment les pluies dévastatrices.

Dès lors, on peut imaginer que, confrontés à l'inefficacité des sacrifices normaux prévus dans le calendrier religieux, la société chimú, désespérée, attendait des prêtres, des guerriers et des autres membres de l'élite une réponse forte à l'énorme stress climatique. Il fallait apaiser la colère du ciel, cette colère à qui on donnerait un jour le nom d'un enfant divin. Et quel meilleur endroit pour le faire que face à un océan, qui deviendrait un jour... Pacifique? ■

## BIBLIOGRAPHIE

G. Prieto et al., **A mass sacrifice of children and camelids at the Huanchaquito-Las Llamas site, Moche Valley, Peru**, *Plos One*, vol. 14 (3), e0211691, 2019.

E. Dufour et al., **Life history and origin of the camelids provisioning a mass killing sacrifice during the Chimú period: Insight from stable isotopes**, *Environmental Archaeology*, en ligne le 1<sup>er</sup> août 2018.

N. Goepfert et al., **Herds for the gods? Selection criteria and herd management at the mass sacrifice site of Huanchaquito-Las Llamas during the Chimú period, northern coast of Peru**, *Environmental Archaeology*, en ligne le 1<sup>er</sup> décembre 2018.

G. Prieto et al., **Lluvias e inundaciones en el siglo XV de nuestra era: sacrificios humanos y de camélidos Chimú en la periferia de Chan Chan**, *Actas del II Congreso Nacional de Arqueología*, Lima, Ministerio de Cultura, pp. 55-65, 2017.

J. D. Moore et C. J. Mackey, **The Chimú Empire**, dans *The Handbook of South American Archaeology* (éd. H. Silverman et W. H. Isbell), Springer, pp. 783-807, 2008.



**L'ESSENTIEL**

> Les prévisions météorologiques à quatre semaines sont de plus en plus précises, grâce notamment à de puissants supercalculateurs.

> Ces progrès sont aussi dus à une meilleure compréhension de phénomènes atmosphériques comme l'oscillation de Madden-Julian et l'oscillation nord-atlantique.

> Une prévision à quatre semaines établie spécialement pour cet article a anticipé correctement certaines anomalies récentes de température et de pluie aux États-Unis, mais a échoué avec d'autres.

**L'AUTRICE**



**KATHY PEGION**  
maîtresse de conférences  
au département des sciences  
de l'atmosphère, des océans  
et de la Terre à l'université  
George-Mason (Virginie)

Une tempête imminente  
photographiée dans le Kansas.

# Des prévisions météorologiques à 28 jours

Prévoir le temps quatre semaines à l'avance ? Les météorologues y arrivent de mieux en mieux, grâce à des superordinateurs et à une compréhension plus fine des phénomènes atmosphériques.

« **O**K Google, quel temps fera-t-il demain? » Il nous est devenu familier de planifier nos activités en fonction de la météo des prochains jours. Nous décidons de sortir ou non le barbecue pour le week-end. Les producteurs d'agrumes protègent les orangers en cas d'annonce de gel. Aux États-Unis, la sécurité civile évacue les villes qui se trouveront sous le vent des feux de forêt et, sous la menace de pluies diluviennes, les habitants de zones inondables se protègent en barricadant leurs portes avec des sacs de sable.

Aujourd'hui, les bulletins météo anticipent l'avenir avec un horizon temporel de sept à dix jours maximum. Pourtant, de nombreux pans de l'économie profiteraient d'une capacité de prévision de trois, voire quatre semaines. À l'annonce d'une gelée de fin de saison, les agriculteurs pourraient revoir leurs calendriers de semis. Les exploitants de ski choisiraient le moment opportun pour actionner les canons à neige sans craindre un redoux. L'hiver, les opérateurs de barrage soulageraient les réservoirs dans la perspective de fortes pluies printanières ou, au contraire, stockeraient l'eau s'ils anticipaient une sécheresse. Sans parler du secteur du tourisme qui vit en partie sous la férule des aléas climatiques et profiterait d'une visibilité à plus long terme.

Or, ces dernières années, les scientifiques spécialistes de l'atmosphère ont commencé à publier des prévisions subsaisonniers qui courent sur trois à quatre semaines. Un bulletin météo classique indique les températures maximales et minimales, la probabilité de pluie ou de neige et les conditions de vent. Une projection subsaisonnaire est moins ambitieuse: sur la base de données historiques, elle prévoit, pour une date donnée, si les températures seront plus élevées ou plus faibles que la moyenne, et si le temps sera plus humide ou plus sec que la normale. Elle essaye également de prédire les conditions météorologiques dangereuses et extrêmes. Cette capacité d'anticipation comble un grand vide entre la météo de tous les jours, à court terme, et les grandes tendances saisonnières capables de préciser par exemple si les conditions du courant côtier saisonnier El Niño, dans l'océan Pacifique, apporteront un été chaud en Amérique du Nord.

Ainsi, un ensemble de modèles météorologiques nommé SubX (pour Subseasonal Experiment ou « expérience de prévision subsaisonnaire »), dont j'ai mené l'élaboration à l'université George-Mason (Virginie) avec un collègue de l'université de Miami, a prédit avec précision plusieurs semaines à l'avance l'augmentation des précipitations associées à l'ouragan Michael en 2018, une invasion d'air froid

dans le Midwest américain fin janvier 2019, et la vague de chaleur de juillet 2019 en Alaska. Le projet SubX, lancé il y a trois ans, combine les prévisions de sept grands centres de recherche sur le climat et la Terre aux États-Unis et au Canada. Il esquisse avec un relatif succès quel sera l'état du ciel dans un mois.

## PRENDRE EN COMPTE LES PHÉNOMÈNES MÉTÉO À TOUTES LES ÉCHELLES

Les prévisions sur sept à dix jours reposent sur des modèles numériques qui simulent l'évolution de l'atmosphère. Ils renferment des équations mathématiques qui estiment comment la température, les vents et l'humidité varieront à partir d'aujourd'hui, seconde après seconde et jour après jour. Depuis l'avènement des modèles météo dans les années 1950, le succès des prévisions à court terme s'est appuyé sur une meilleure compréhension de la physique de l'atmosphère doublée d'une explosion de la puissance de calcul. En 1990, pour produire des bulletins météo ayant 80% de chance d'être exacts, il fallait se limiter à un horizon de trois jours. Aujourd'hui, les prévisions à sept jours se sont hissées au même niveau de précision.

Quels paramètres sont utilisés pour livrer une prévision à trois ou quatre semaines? Comme les projections à court terme, l'exercice débute avec les conditions climatiques actuelles. Chaque jour, des agences météorologiques et spatiales aux quatre coins du globe, dont la NOAA (l'agence américaine



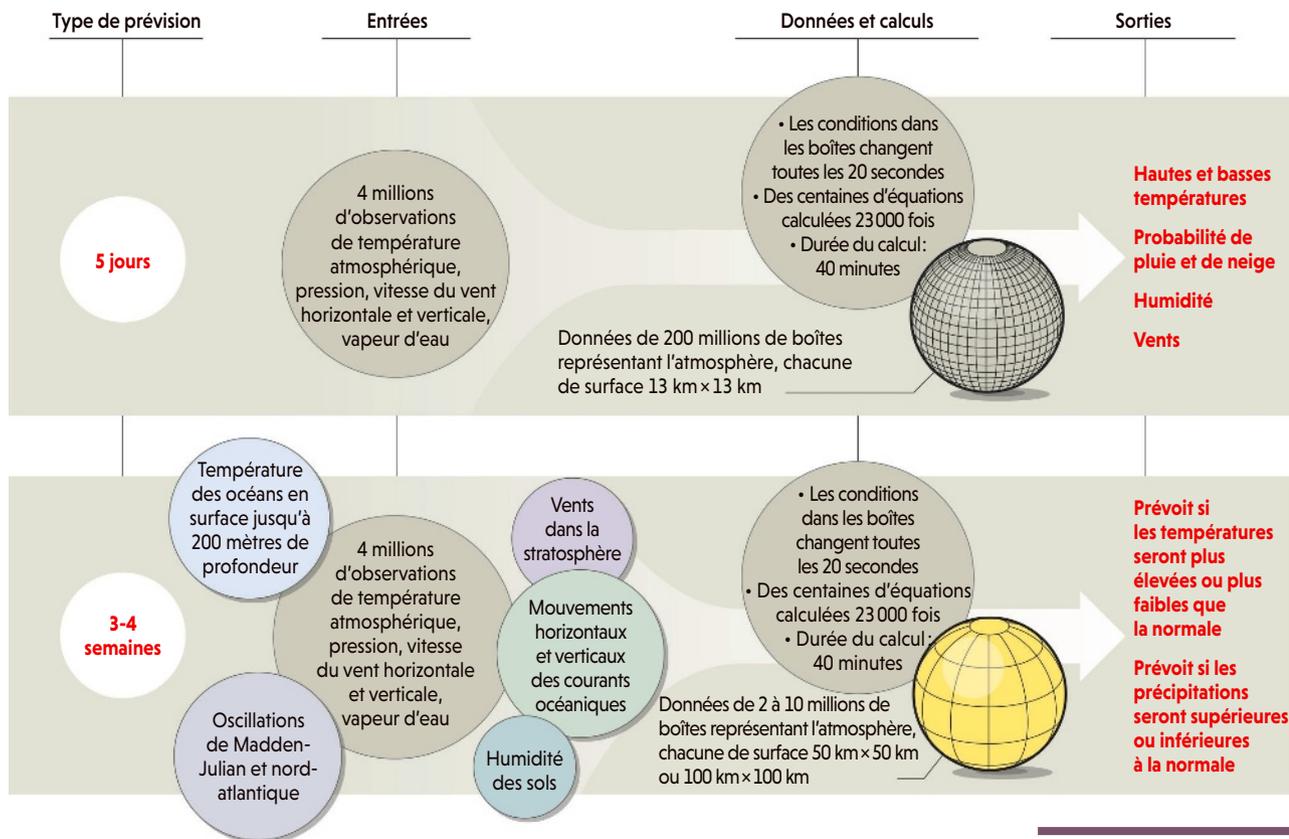
# SubX a prédit plusieurs semaines à l'avance la vague de chaleur de l'été 2019 en Alaska

d'étude des océans et de l'atmosphère) et la Nasa, produisent environ quatre millions de mesures de la température de l'air, de la pression atmosphérique, du vent et de l'humidité, à partir de ballons, de stations au sol, d'avions et de satellites. Afin d'étendre les prévisions à quatre semaines, les spécialistes de l'atmosphère ajoutent à ce socle d'autres facteurs comme la température des océans et la force des courants.

## ATMOSPHÈRE EN ENTRÉE, PRÉVISION EN SORTIE

Une prévision à trois ou quatre semaines requiert énormément de ressources informatiques, qu'il s'agisse du traitement de données et de la puissance de calcul. Les météorologues s'appuient sur les mêmes conditions initiales que les prévisions à cinq jours. Par rapport à ces prévisions,

ils considèrent davantage de caractéristiques du climat global, même s'ils en restreignent le niveau de détail pour limiter le temps de calcul. En sortie, le programme prédit si les températures et les précipitations seront au-dessus ou en dessous des normales saisonnières (ci-dessous, les paramètres du modèle SubX).



© Jen Christiansen

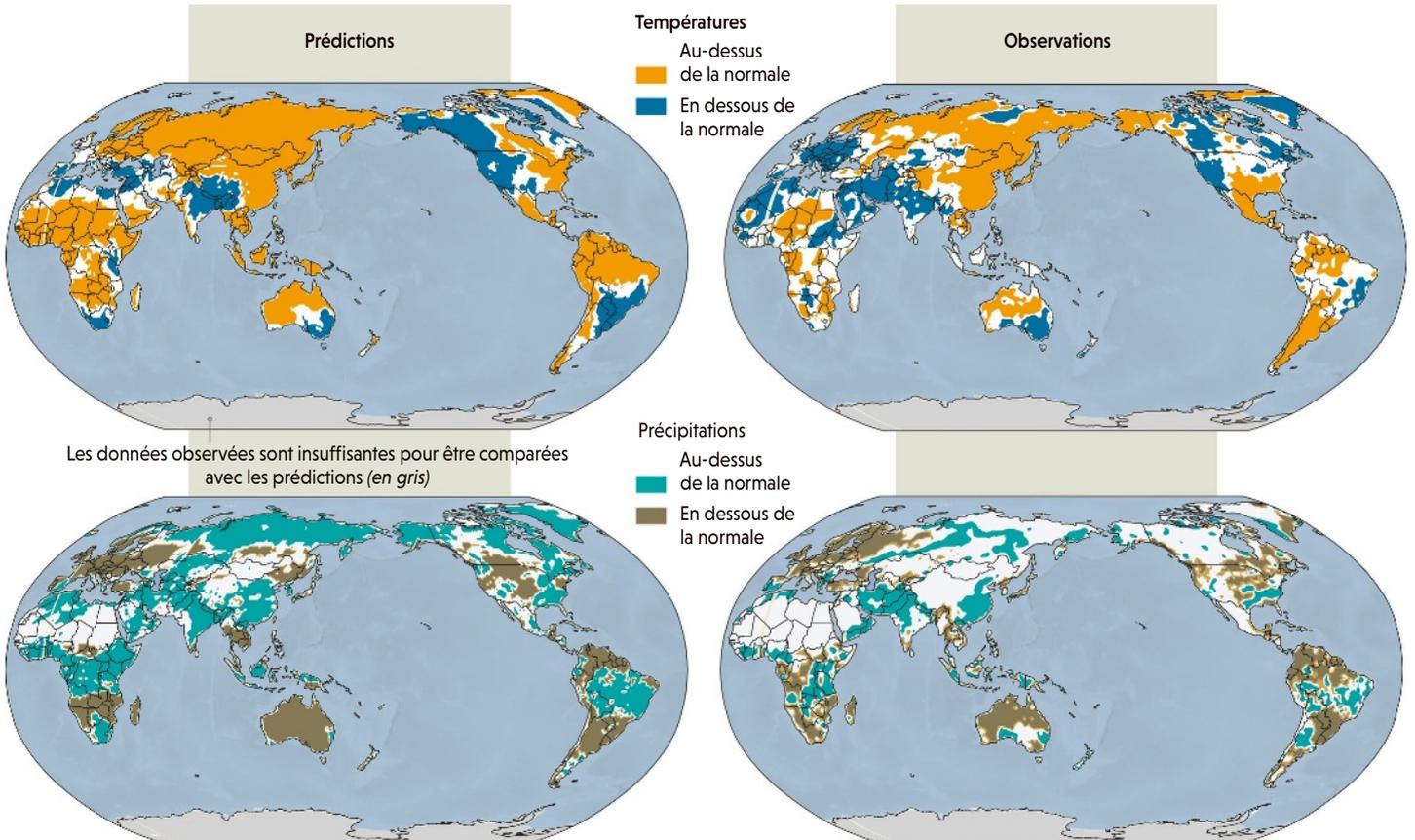
Ils analysent aussi les conditions du sol, car quelques jours d'un temps chaud et sec suffisent à assécher la terre et à limiter l'évaporation, ce qui réduit en retour les précipitations et peut amorcer un début de sécheresse. Enfin, ils intègrent la vitesse des vents soufflant dans la stratosphère, la couche du ciel allant de 10 à 48 kilomètres d'altitude. Les vents influencent la localisation et la force du jet-stream (ou courant-jet), un courant de puissants vents d'altitude qui déplacent en général les tempêtes d'ouest en est dans l'hémisphère Nord et dessinent la carte des températures extrêmes.

En complément, les modèles saisonniers incluent certains phénomènes météo et climatiques. L'un d'eux est l'oscillation de Madden-Julian (OMJ), une gigantesque perturbation le long de l'équateur associant nuages, pluies et vents (elle est due à

d'immenses mouvements de convection dans l'atmosphère). L'OMJ naît dans les océans Indien et Pacifique tropicaux et voyage d'ouest en est autour de la Terre en plusieurs mois. Cet événement survient quatre à six fois dans l'année, de façon aléatoire ou par vagues successives. L'OMJ influence les vents, la localisation des centres de basses et hautes pressions et leurs lignes de rencontre dans de nombreuses régions. Par exemple, l'oscillation crée des « rivières atmosphériques », des bandes de pluies torrentielles qui s'étirent de l'océan Pacifique jusqu'au continent américain et qui contribuent fortement aux précipitations tombant sur la côte ouest de l'Amérique du Nord. À l'échelle de la semaine, l'OMJ peut aussi augmenter le cisaillement du vent à certains endroits et le diminuer à d'autres, ce qui influe sur le lieu de formation des cyclones tropicaux (la prise en compte de l'OMJ explique >

DES PRÉVISIONS  
À UN MOIS  
POUR  
MARS 2020

**L**e 27 février 2020, le modèle de prévision subsaisonniers SubX a prédit le temps qu'il ferait du 21 au 27 mars, soit un mois à l'avance. Les cartes indiquaient si les températures et les précipitations seraient au-dessus ou en dessous des normales saisonnières – la moyenne de la période 1999-2015. Les cartes de la météo effective de mars montrent que SubX a correctement prédit la sécheresse sévissant en Europe et en Australie. Le modèle a également prédit avec succès la fraîcheur frappant l'ouest des États-Unis et la chaleur à l'est du pays, mais le nord-est n'a pas été aussi chaud que prévu. SubX anticipe de combien les conditions s'écarteront des moyennes, mais les valeurs prédites ont manqué de précision cette fois-ci.



> probablement en partie pourquoi SubX a su prédire l'ouragan Michael).

L'oscillation nord-atlantique (ONA) est un autre phénomène considéré. Il s'agit d'un couplage permanent de basses et de hautes pressions dans le nord de l'Atlantique. Plusieurs régimes alternent, caractérisés par la différence de pression entre l'Islande et les Açores, et influencés par des phénomènes comme l'OMJ ou les vents stratosphériques. L'ONA module la forme de l'écoulement du jet-stream et la position du vortex polaire (un tourbillon d'air froid qui se maintient au-dessus du pôle Nord) et peut donc transporter de l'air froid de l'Arctique vers le nord-est des États-Unis et l'Europe. En réalité, l'ONA et l'OMJ figurent déjà dans les modèles de prévisions à cinq jours, mais sous une forme peu

influente et négligeable pour l'Amérique du Nord et l'Europe. En revanche, ces phénomènes sont des composantes essentielles des prévisions à un mois dans ces régions. (Dans les zones tropicales, c'est différent: les prévisions à cinq jours de l'OMJ sont très importantes pour savoir si la journée sera pluvieuse ou ensoleillée.)

**UN COMPROMIS  
ENTRE RÉOLUTION  
ET TEMPS DE CALCUL**

Calculer une prévision subsaisonniers fait appel à un tel nombre d'opérations et de variables que l'exercice essouffle même les plus puissants ordinateurs du monde. Les modèles numériques découpent l'atmosphère tridimensionnelle en une multitude de petites

boîtes. À titre d'exemple, la nouvelle simulation de la NOAA compte 200 millions de boîtes; les boîtes proches de la surface de la Terre couvrent un carré de 13 kilomètres de côté et s'élèvent sur 50 mètres. D'autres boîtes s'empilent au-dessus, de plus en plus grandes à mesure qu'on s'éloigne du sol, atteignant 700 mètres de haut dans la stratosphère. Le modèle prédit l'évolution de l'atmosphère dans chaque boîte toutes les 20 secondes.

Une fois assemblées, les boîtes dessinent une photographie du temps à venir. Pour fournir une prévision à cinq jours, un modèle a besoin de calculer quelque 23 000 fois d'affilée des centaines d'équations; exécuter ces opérations sur un superordinateur doté de 1 500 cœurs de calcul prend à peu près 40 minutes.

En pratique, les météorologues doivent trouver le point d'équilibre entre une excellente résolution et un temps de calcul contenu. Par exemple, même les modèles à cinq jours écartent certains paramètres comme les petits nuages, les orages et les effets de site engendrés par les littoraux, les montagnes ou d'autres types de terrains remarquables. Prendre en compte ces phénomènes exigerait de resserrer la taille des boîtes jusqu'à une résolution de six kilomètres, ce qui se traduirait par un temps de calcul de plus de cinq heures. Or le météorologue de votre région ne peut pas attendre aussi longtemps pour livrer son bulletin.

À l'inverse, pour établir des prévisions à quatre semaines qui incluent toute la richesse

pixelisée à basse résolution et vous aurez une idée d'une prévision à trois ou quatre semaines: on distingue le tableau général (les grandes zones de chaleur et pluie), mais les détails comme un orage nous échappent.

Malgré cela, la compréhension des phénomènes physiques globaux, les algorithmes et la puissance de calcul se sont suffisamment améliorés pour produire une photographie à basse résolution acceptable pour les météorologistes.

## UNE COMBINAISON DE PLUSIEURS MODÈLES

Chaque semaine, les sept centres qui contribuent à SubX créent leurs propres prévisions sur 32 à 45 jours, incorporant plusieurs milliers d'observations (températures et humidité du sol, température et vitesse des courants océaniques...) de plus que ce qu'ils incluraient dans une perspective de sept jours. Les groupes envoient ensuite leurs résultats à une base de données centrale hébergée par l'Institut international de recherche sur le climat et la société, à l'université Columbia. Puis SubX combine les données sur les ordinateurs de l'université George-Mason. L'équipe SubX est la seule qui intègre plusieurs modèles dans une prévision saisonnière rendue publique. Ces modèles diffèrent notamment par les méthodes numériques employées, les équations de la physique – rayonnement, nuages... – et la méthodologie pour créer les conditions initiales à partir des données observées. Une dizaine d'autres groupes dans le monde, tels que le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, produisent des prévisions saisonnières fondées, elles, sur des modèles uniques.

Quel genre de prévision produit SubX? Notre modèle crée des cartes de températures et de précipitation où figurent les zones prévues pour être plus chaudes ou plus froides, plus humides ou plus sèches, que la moyenne historique. Réunir les résultats de sept modèles nous fournit des prévisions meilleures que chaque modèle pris séparément, à la fois parce que nous moyennons les données de chacun et parce que nous tirons parti du meilleur de chacun. Par exemple, chaque modèle doit estimer l'état nuageux dans chaque boîte, et ils le font tous de façon légèrement différente. La combinaison des modèles crée une meilleure évaluation. En termes de qualité de prévision pour la météo aux États-Unis, SubX surpasse ses meilleurs modèles pris individuellement 60% du temps pour la température et 81% du temps pour les précipitations.

Les scientifiques de SubX explorent les moyens de mieux associer les modèles, et nous cherchons également à les améliorer en les testant sur des données anciennes. >



# Une prévision à 5 jours nécessite de calculer 23000 fois des centaines d'équations

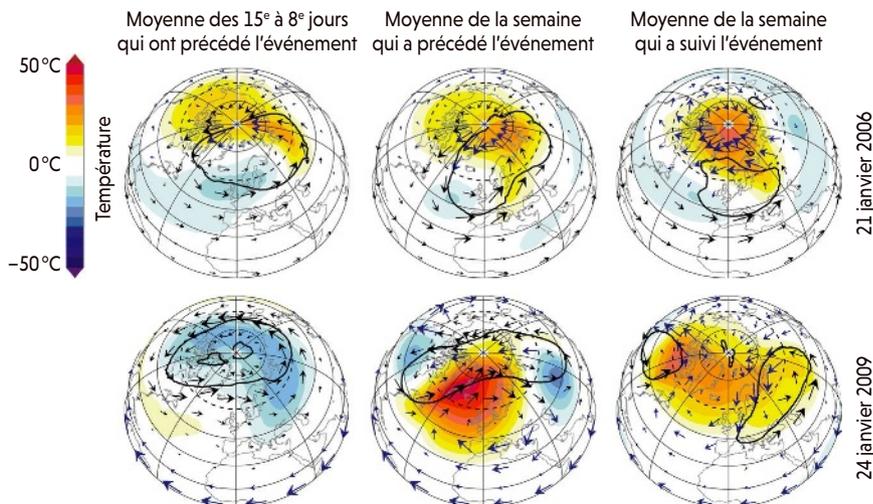
des phénomènes atmosphériques à grande échelle (dont l'oscillation OMJ), il faut agrandir les boîtes et réduire leur nombre (typiquement, leur nombre passe de 200 millions à 2 ou 10 millions, selon les modèles). Élargir les boîtes à une taille de 50 ou 100 kilomètres nous permet de conserver un temps d'exécution du programme de 40 minutes, en perdant des détails toutefois. Songez à une photo

## LES PRÉVISIONS SUBSAISON- NIÈRES EN EUROPE

Prévoir le temps au-delà de dix jours, jusqu'à trois à quatre semaines en avance, représente une nouvelle frontière pour la prévision météorologique. De quels phénomènes atmosphériques faut-il tenir compte pour prévoir le temps en Europe à cet horizon temporel ? D'abord de l'oscillation nord-atlantique (ONA), qui mesure la différence de pression entre l'Islande et les Açores. Sa phase positive, qui se produit environ 30 % du temps, conduit à des vagues pluvieuses sur l'Europe du Nord et un temps sec sur l'Europe du Sud. La phase négative engendre l'inverse. En cas d'ONA particulièrement négative, les hivers seront froids et les étés chauds. Une autre source d'aléa pour la météo du continent est l'oscillation de Madden-Julian (OMJ), qui se caractérise par une progression lente vers l'est de zones de pluies tropicales le long de l'Équateur. La présence de l'OMJ sur l'océan Indien est souvent suivie par une phase positive de l'ONA, dix à quinze jours plus tard, et peut donc moduler le temps qu'il fera en Europe les semaines suivantes.

Les vents stratosphériques influencent aussi le temps à un mois. Moins d'une fois par an, la température de la stratosphère au-dessus du pôle Nord augmente fortement (jusqu'à 30 °C) et les vents qui y soufflent faiblissent, voire changent de direction. Ce phénomène spectaculaire qui peut être prévu par les modèles météorologiques jusqu'à trois semaines en avance est souvent suivi d'une phase négative de l'ONA et de temps froid sur une partie de l'Europe. D'autres sources de prévisibilité pour l'Europe incluent la température et l'humidité du sol, la température de surface de l'océan, l'étendue de la couche glaciaire arctique, la couverture neigeuse...

L'ensemble de ces facteurs sont pris en compte au Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), où je travaille. Situé à Reading, en Grande-Bretagne, ce centre est un organisme intergouvernemental comprenant la plupart des pays européens. Il a été un des pionniers dans les prévisions à un mois. Au début des années 2000, il était avec l'Agence météorologique japonaise le seul centre météorologique diffusant des prévisions saisonnières. Aujourd'hui, plus



Deux événements de réchauffement stratosphérique soudain survenus l'un le 21 janvier 2006 (en haut) et l'autre le 24 janvier 2009 (en bas). Dans le premier, le vortex polaire (ligne noire épaisse) – les vents de haute altitude en Arctique – s'est déplacé, tandis qu'il s'est scindé en deux dans le second.

d'une douzaine d'instituts météorologiques dans le monde produisent des prévisions à quatre semaines, dont quatre en Europe (le CEPMMT, l'Office météorologique anglais, un centre en Italie et un à Météo-France).

Comment sont produites les prévisions au CEPMMT ? À l'aide d'une simulation numérique d'une grande complexité, qui comprend, outre un modèle de la circulation atmosphérique, des sous-modèles représentant des composants du système terrestre : l'océan, les glaces, le sol...

### Nous prévoyons l'oscillation OMJ plus de 5 semaines à l'avance

L'atmosphère est un système chaotique : des petites différences dans les conditions initiales peuvent conduire à des prévisions très différentes à trois ou quatre semaines. C'est pourquoi les prévisions sont réalisées en faisant tourner le modèle de multiples fois (51 fois au CEPMMT et entre 4 et 50 fois dans la plupart des autres centres météorologiques), chaque fois avec des conditions initiales légèrement différentes afin d'estimer l'impact des erreurs dans la génération des conditions initiales. Au CEPMMT, ces 51 calculs conduisent à 51 scénarios de temps possibles. Si, par exemple, 40 d'entre eux indiquent un temps sec sur la France dans quatre semaines, alors la probabilité de temps sec sera estimée à 80 %. Les prévisions à cette échelle de temps sont toujours probabilistes. Nous avons prévu d'étendre ce nombre de réalisations à une centaine, ce qui donnera des prévisions beaucoup plus précises de la probabilité d'événements rares.

La prévision saisonnière a progressé considérablement ces dernières années : nos prévisions à quatre semaines sont aujourd'hui aussi fiables que les prévisions à trois semaines d'il y a quinze ans. En particulier, nous sommes

maintenant capables de prévoir l'OMJ plus de cinq semaines à l'avance au lieu de seulement deux semaines au début des années 2000. Par rapport à d'autres centres météorologiques, les prévisions saisonnières du CEPMMT figurent souvent parmi les plus fiables. Ces succès sont dus à des améliorations de notre modèle numérique et à l'utilisation de nouvelles observations pour l'initialiser.

Même s'il y a toujours un peu de compétition entre les différents centres météorologiques internationaux, l'heure est plutôt à la collaboration. Pour preuve, l'Organisation météorologique mondiale a lancé il y a plusieurs années un projet que je codirige avec un collègue américain afin d'améliorer la prévision saisonnière. Ce projet a permis de créer une base de données agrégeant les prévisions réalisées par onze centres internationaux sur une longue période. Semblable dans l'esprit à celle livrée par SubX, notre base s'en distingue par le fait qu'elle est dédiée uniquement à la recherche et ne contient pas les prévisions les plus récentes. Cependant elle contient plus de modèles et plus d'information par modèle. En tout, cela représente plus de 100 téraoctets de données. À ce jour plus de 150 articles exploitant cette base de données ont été publiés, qui permettent d'avoir une idée plus précise de la qualité de nos prévisions, et surtout d'identifier les principales limitations de nos modèles numériques. À l'aide de ces comparaisons, nous avons compris par exemple la nécessité de modéliser plus finement la stratosphère pour améliorer les prévisions saisonnières.

Ces prévisions devraient continuer à progresser dans les années à venir grâce à des modèles toujours plus complexes (ajout de modèles de chimie, de végétation...) qui devraient inclure de nouveaux effets atmosphériques (l'impact de la poussière volcanique, de l'ozone...) et opérer à des résolutions plus fines. L'utilisation de modèles d'intelligence artificielle pour, par exemple, mieux interpréter les résultats des modèles, devrait également conduire à de meilleures prévisions à quatre semaines.

#### FREDERIC VITART

chercheur au CEPMMT (ECMWF en anglais), à Reading, Royaume-Uni

> Pendant une année entière, SubX a effectué de nombreuses prévisions à trois à quatre semaines en partant de conditions météorologiques hebdomadaires de 1999 à 2015, et a produit une base de données de plus de 20 téraoctets d'informations. Pour chaque exécution du programme, nous avons comparé les prévisions avec le temps qu'il a vraiment fait trois et quatre semaines plus tard. Cela nous a permis de tester les effets de conditions climatiques variées.

Nous utilisons à présent les accords et imprécisions que nous avons identifiés pour améliorer les performances des modèles, notamment la justesse avec laquelle ils représentent la stratosphère, l'OMJ et l'ONA, et prévoir les impacts de ces phénomènes sur la météo dans différentes régions. Par exemple, deux des groupes de la NOAA qui fournissent des données à SubX ont affiné leurs équations décrivant les nuages, les orages et les pluies pour mieux représenter l'OMJ. Puis ils ont appliqué leurs modèles sur des données archivées et ont constaté un net progrès des prévisions à trois à quatre semaines.

## UN TEST EN MARS DERNIER

Comme exercice pour cet article, j'ai utilisé SubX pour prévoir le temps aux États-Unis et dans le monde entre le 21 et le 27 mars de cette année, soit entre 23 et 29 jours dans le futur pour moi (voir l'encadré page 70). Le programme a prédit des températures au-dessus des normales saisonnières dans l'est des États-Unis et plus fraîches dans l'ouest. Selon le

# Nous utilisons les conditions météo de 1999 à 2015 pour affiner nos modèles

modèle, l'hiver se prolongerait à l'ouest tandis que le printemps éclorait sur la côte est. Simultanément, le sud-ouest du pays continuerait d'être pluvieux, après un mois de février particulièrement humide. Plusieurs de ces prédictions se sont avérées. D'autres non.

Le temps pluvieux s'est bien maintenu dans le sud-est. Cette prévision aurait été une information précieuse pour anticiper les

inondations dans cette région. En effet, le fleuve Mississippi à la Nouvelle-Orléans était déjà proche de la crue le 27 février, son niveau s'est abaissé légèrement après avoir atteint un pic le 8 mars, puis n'a cessé de s'élever fin mars-début avril, pour atteindre de nouveau un stade critique le 12 avril. SubX a su anticiper ce scénario en partie parce qu'il avait prédit des températures océaniques chaudes dans le golfe du Mexique, une condition clé pour qu'il pleuve dans le sud-est du pays. SubX a su également annoncer des conditions plus froides que la normale le long de la côte ouest, ainsi que des conditions plus sèches dans le nord de la Californie et sur la côte de la Colombie-Britannique.

Dans le reste du monde, SubX a situé correctement les systèmes de basses et hautes pressions, ce qui lui a permis d'entrevoir les conditions plus sèches que la normale qui ont régné au-dessus de l'Europe et celles plus chaudes sur l'Asie. En Australie, les prévisions de température se sont aussi vérifiées, sans doute grâce à la capacité du modèle à dessiner les contours des régions nuageuses et ensoleillées accompagnant l'OMJ.

En revanche, SubX a surestimé l'étendue géographique des zones où il a fait plus chaud que d'habitude, à la fois dans le nord-est des États-Unis et dans la vallée de la rivière Ohio. Par ailleurs, le modèle a mal anticipé certains détails des systèmes de hautes et basses pressions, ce qui a nui aux prévisions. Il a aussi échoué à prévoir les conditions plus humides que la moyenne en Oregon, même si les fortes pluies se sont concentrées sur deux jours seulement, les 24 et 25 mars. Pour sa défense, nous avons relancé indépendamment les sept modèles qui composent SubX et la plupart d'entre eux ont été incapables de prédire ces pluies brutales à une échelle plus courte; la tempête qui a produit les précipitations a posé un problème même pour une prévision à sept jours. Le chaos peut survenir de manière inattendue dans l'atmosphère.

Nous avons encore du chemin à parcourir avant que les projections saisonnières soient aussi abouties que les prévisions sur sept jours, et elles pourraient ne jamais le devenir. Mais un grand nombre de scientifiques de l'atmosphère travaillent dur pour y parvenir. Chaque semaine, je publie des prévisions globales à quatre semaines fournies par chacun des sept modèles et par SubX. Puis, à son tour, le Centre de prévision climatique de la NOAA livre une prévision à trois ou quatre semaines pour les États-Unis en utilisant les indications de SubX. Dans une dizaine d'années, lorsque vous consulterez la météo sur votre téléphone, vous verrez peut-être dans un coin une icône représentant un soleil ou un nuage avec l'indication «prévision à 28 jours». ■

## BIBLIOGRAPHIE

K. Pegion et al., **The subseasonal experiment (SubX) : A multimodel subseasonal prediction experiment**, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 100(10), pp. 2043-2060, 2019.

P. Bauer et al., **The quiet revolution of numerical weather prediction**, *Nature*, vol. 525, pp. 47-55, 2015.

F. Vitart et al., **Subseasonal Predictions**, ECMWF, 2014.

# Constantin Rafinesque

## ou les tribulations d'un naturaliste peu ordinaire

Des personnages atypiques, l'histoire ne retient souvent que les lubies. Mais l'excentricité de Constantin Rafinesque, négociant et naturaliste, ne saurait éclipser le rôle majeur qu'il a tenu dans l'histoire des sciences naturelles.

Quand il s'éteignit en septembre 1840, le zoologiste et botaniste d'origine française Constantin Samuel Rafinesque souffrait auprès de ses collègues naturalistes d'une réputation, en partie fondée, d'excentrique notoire. De fait, la figure de ce chercheur commence seulement à être appréhendée à sa juste valeur, celle d'un acteur crucial du développement des sciences naturelles américaines, au XIX<sup>e</sup> siècle. Ainsi se dessine graduellement le portrait d'un personnage complexe et attachant, bien loin de l'image de « savant fou » doublé d'un polygraphe échevelé, ébauchée jusque-là.

### UNE VOCATION SCIENTIFIQUE PRÉCOCE

Bien qu'issu d'une famille protestante d'ascendance cévenole, Constantin Rafinesque se fit d'abord connaître par des recherches menées en Sicile, avant de s'établir définitivement aux États-Unis. Il naquit en 1783 à Galata, dans la banlieue d'Istanbul, de l'union de François Georges Rafinesque, négociant et armateur marseillais, grand voyageur devant l'Éternel, et de Madeleine Schmaltz, une jeune femme d'origine allemande. La famille revint peu après se fixer à Marseille, ville d'origine du père de Constantin. Mais, en 1792, les soubresauts de la Révolution incitèrent Madeleine Rafinesque à quitter la France pour la ville italienne de Livourne; son mari, alors en >

Dans le carnet que Constantin Rafinesque rédigea pendant son voyage de Philadelphie au Kentucky, en 1818, le naturaliste décrivit onze « espèces » de rats sauvages (ci-contre, quatre d'entre elles). Par la suite, seule une (non montrée) a été reconnue comme telle. Les autres se sont révélées des espèces inventées par le naturaliste Jean-Jacques Audubon pour duper Rafinesque.



**L'ESSENTIEL**

> Passionné de botanique et de faune marine dès sa jeunesse, Constantin Rafinesque n'eut de cesse d'explorer la nature, que ce soit en Sicile, où il fut négociant, ou aux États-Unis, où il s'installa en 1815.

> Devenu explorateur, puis professeur de sciences naturelles à l'université du Kentucky, il suscita l'hostilité de nombreux collègues, surpris par ses tenues décalées,

son franc-parler et ses méthodes d'enseignement atypiques, et échaudés par son manque d'esprit critique.

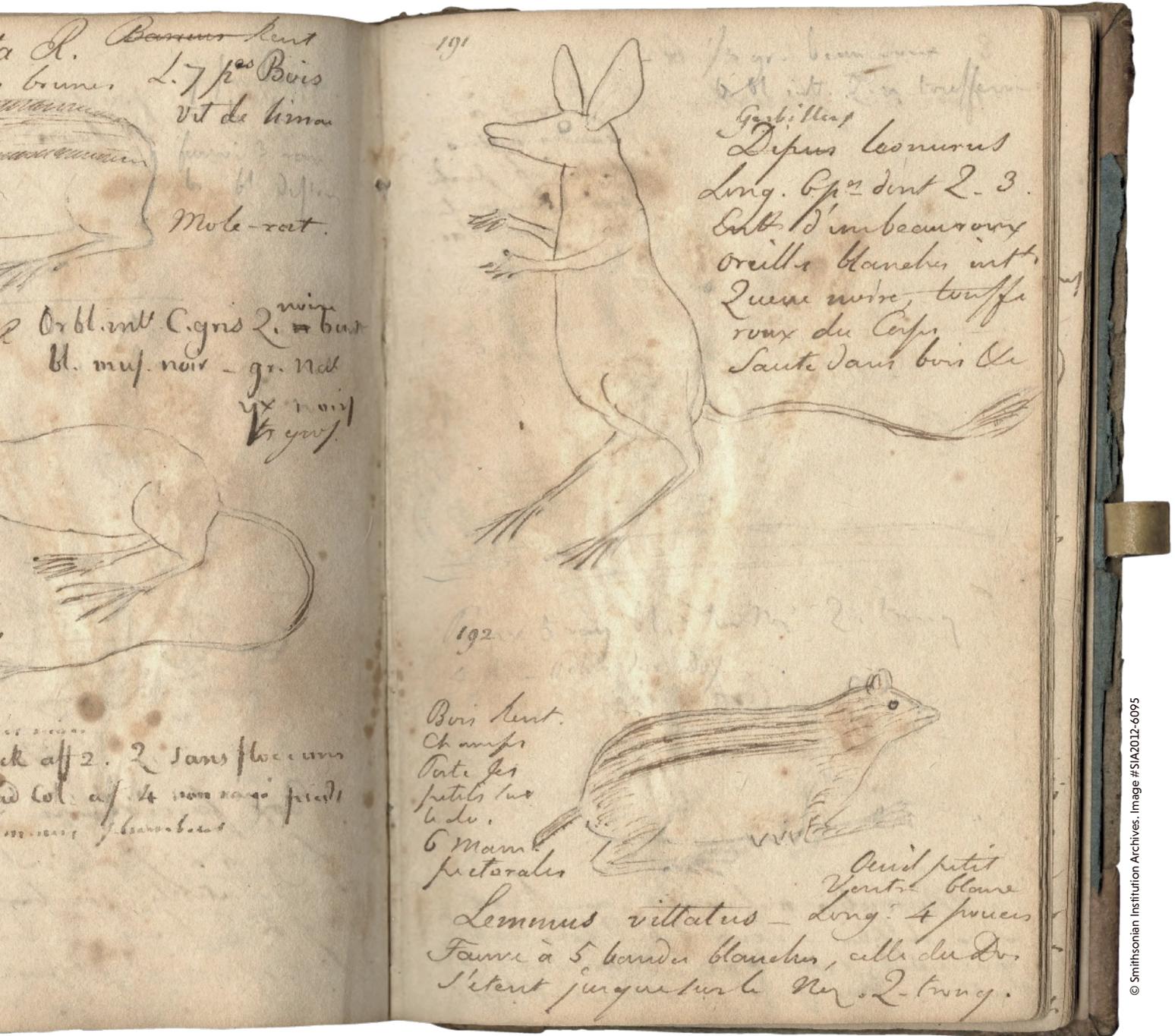
> Il fut même la victime de plusieurs mystifications scientifiques.

> Néanmoins, il fut l'un des premiers évolutionnistes et décrivit de nombreuses espèces encore valides aujourd'hui.

**L'AUTEUR**



**BENOÎT GRISON**  
enseignant-chercheur de  
l'UFR Sciences et Techniques,  
à l'université d'Orléans



© Smithsonian Institution Archives. Image #SIA2012-6095

> voyage, décéda un an plus tard aux États-Unis des suites d'une fièvre jaune. L'essentiel de l'adolescence et de la formation (surtout autodidacte) de Constantin Rafinesque se déroula en Italie, sa mère s'étant remariée à un homme d'affaires exerçant dans la péninsule. Déjà passionné de botanique et de faune marine, le naturaliste en herbe s'exerça également à l'apprentissage du métier de négociant dans le sud de la France.

Un tournant majeur dans le parcours de Rafinesque fut son séjour de deux ans en Amérique, où il partit travailler en 1802 avec son frère pour une firme d'horticulture de Philadelphie. Le jeune homme rencontra le président Thomas Jefferson, féru de sciences, qu'il sut impressionner, et herborisa bientôt à travers le New Jersey, le Delaware, et aux alentours de la baie de Chesapeake. Ses rencontres avec des tribus indiennes éveillèrent chez lui une passion – qui ne se démentira jamais – pour l'histoire précolombienne. Bien qu'accueilli chaleureusement par les naturalistes du cru, Rafinesque s'étonnait de leur ignorance de l'« école française » des sciences naturelles, celle du naturaliste Jean-Baptiste de Lamarck, du botaniste Antoine-Laurent de Jussieu et du zoologiste Bernard-Germain de Lacépède. Ayant exprimé à Jefferson l'intérêt qu'il portait à l'exploration de l'Ouest sauvage qu'allaient conduire les explorateurs américains Meriwether Lewis et William Clark, le président finit par lui proposer par courrier le poste de botaniste de l'expédition... mais la lettre ne parvint jamais à son destinataire, celui-ci étant déjà reparti pour l'Europe au début de 1805, afin de rejoindre un poste lucratif qui l'attendait en Sicile.

## DE LA SICILE AUX ÉTATS-UNIS

Le séjour sicilien de Rafinesque dura dix ans et lui permit de s'affirmer comme un scientifique reconnu. Le grand pionnier italien de la biologie, Lazzaro Spallanzani, avait souligné tout l'intérêt qu'il y aurait à approfondir l'histoire naturelle de la Sicile. Tout comme le malacologiste Giuseppe Poli et Jeanne Villepreux-Power – qui expérimenta sur cet étrange céphalopode qu'est l'argonaute –, Rafinesque fut de ceux qui accomplirent ce vœu. Il travailla pendant quelques années auprès du banquier Abraham Gibbs, alors consul des États-Unis à Palerme, avant de se mettre à son compte comme négociant, exportant aussi bien des plantes médicinales... que son propre cognac.

Ses intérêts allant de l'archéologie antique aux « invertébrés » marins de l'île (en passant par son volcanisme), il entama une



Constantin Rafinesque, probablement peint par William Birch en 1810.

correspondance suivie avec divers maîtres des sciences naturelles de l'époque, tels le botaniste Augustin Pyrame de Candolle et le naturaliste Georges Cuvier. Ce dernier, avec lequel Rafinesque collaborait à propos de l'ichtyologie de la Méditerranée, ne se priva pas de lui reprocher de multiplier à outrance les genres nouveaux de poissons ! Ce goût compulsif pour la description de taxons inédits, parfois contestables, ne le quittera jamais tout au long de sa carrière de chercheur. Il y avait cependant des circonstances atténuantes à ces excès taxinomiques : ainsi cette *Balena gastritis*, qu'il décrit en 1815 sur la base d'un spécimen échoué sur la plage de Carini, n'était-elle sans doute qu'un rorqual commun juvénile, mais il faut souligner qu'à l'époque, la cétologie en était encore à ses balbutiements.

Durant cette décennie sicilienne, notre naturaliste se mit en ménage avec une charmante jeune femme, Joséphine Vaccaro. Hélas, l'enfant cadet du couple, baptisé Charles-Linné en l'honneur du père de la systématique, mourut à l'âge de un an à peine. Après avoir créé plusieurs journaux scientifiques et publié son *Analyse de la nature*, un précis d'histoire naturelle aussi synthétique que brillant, Constantin Rafinesque quitta définitivement la Sicile. Sa brouille avec sa compagne était certainement pour quelque chose dans cette décision, mais sa quête de titres de gloire scientifiques encore davantage. Il avait caressé l'idée de rejoindre Paris, où ses collègues du Muséum auraient pu lui faire prendre un nouveau départ, mais la survenue des Cent-Jours le dissuada d'opter pour cette possibilité. Par ailleurs, le projet d'exploration de l'Australie qu'il avait soumis à Joseph Banks, l'éminent naturaliste président de la Royal Society, n'ayant pas convaincu ce dernier, sa décision

## TEL EST PRIS...

**Audubon a fait d'autres dupes éminentes : l'ornithologue américain Matthew Halley vient ainsi de démontrer qu'un rapace décrit par lui dans ses *Oiseaux d'Amérique*, *Falco washingtonii*, que l'on croyait éteint depuis, était en réalité une invention pure et simple du peintre naturaliste !**

**Et Audubon lui-même, un temps mystifié par son ami le taxidermiste John Graham Bell, faillit décrire une nouvelle espèce d'oiseau sur la base d'un faux spécimen composite. La conviction, partagée par les pionniers de l'histoire naturelle de l'époque, que l'Amérique était le lieu de tous les possibles naturalistes, les a parfois conduits à des errements divers.**

M. R. Halley, Audubon's bird of Washington: unravelling the fraud that launched the birds of America, *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, vol. 140(2), pp. 110-141, 2020.



> que Jefferson et le naturaliste allemand Alexander von Humboldt, dont l'expédition en Amérique s'était achevée en 1804 par une rencontre avec le président, espéraient très sérieusement voir Lewis et Clark ramener un mammouth relique des territoires du nord-ouest des États-Unis! En conséquence, Rafinesque comptait bien prendre part au plus grand nombre possible de découvertes dans son pays d'adoption.

Cela étant dit, la visite qu'il fit à son collègue Audubon durant l'été 1818, à Henderson, sur les rives de l'Ohio, faillit ruiner sa réputation scientifique de façon définitive. En effet, le célèbre peintre animalier tendit un piège cruel au malheureux Rafinesque: il lui fournit plusieurs dizaines de descriptions, parfois assorties de dessins, d'animaux «nouveaux» censés vivre dans la région (surtout des poissons et des rongeurs). Constantin, tombant dans le panneau, entérina ces taxons «inédits»! Il en intégra même certains dans son traité sur

la faune aquatique de l'Ohio, tenu encore aujourd'hui pour un ouvrage fondateur de l'ichtyologie nord-américaine...

Certes, Rafinesque se serait montré un hôte pénible – il aurait même cassé le précieux violon de Crémone d'Audubon! –, mais cela ne



## Sur les millions de taxons qu'il a décrits, quelque 300 espèces sont encore valides



suffit pas à expliquer l'animosité latente d'Audubon. Très ambitieux, ce dernier devait percevoir notre naturaliste comme un concurrent potentiel et, de l'avis des historiens et des témoins du temps, le portrait qu'il traça de son «ami» dans le récit ultérieur était une caricature à charge.

Rafinesque s'intéressa également aux nombreux témoignages de «serpents de mer» qui fleurirent en 1817 sur la côte de la Nouvelle-Angleterre, émanant de témoins éduqués, pour conclure que l'on avait affaire à un grand vertébré marin inconnu. Il convient ici de ne pas juger cette prise de position de façon anachronique: la question du célèbre monstre aquatique était alors prise au sérieux par la communauté scientifique, qu'il s'agisse de Benjamin Silliman, professeur de sciences naturelles à l'université Yale, ou encore de la Société linnéenne de Boston.

En revanche, quand notre biologiste avance, à la même époque, l'existence dans le lac Érié, à proximité du Niagara, d'une anguille géante d'une espèce nouvelle, il verse dans la crédulité – on sait aujourd'hui que le «monstre de l'Érié» n'a d'existence que folklorique. À cet égard, Rafinesque préfigure, pour le meilleur et pour le pire, ce qui deviendra la cryptozoologie au XX<sup>e</sup> siècle.

Les apports de notre savant à l'anthropologie (au sens large) sont pareillement ambivalents. Ainsi, Constantin, le premier, comprit que les points et barres relevés dans les glyphes mayas figuraient des chiffres: cette découverte de taille, publiée en 1832 dans son périodique *l'Atlantic Journal and Friend of Knowledge*, ne fut reconnue à sa juste valeur que bien plus tard. À l'inverse, quand, à la fin de sa vie, il affirma avoir déchiffré les pictogrammes de ce qui formerait l'épopée des Indiens Delaware, le *Walam Olum*,

Rafinesque fut le premier à comprendre que dans les glyphes mayas (ici une table de glyphes mayas de Palenque publiée dans sa revue *Journal and Friend of Knowledge*) les points et les barres représentaient des chiffres.

**TABULAR VIEW  
OF THE COMPARED ATLANTIC  
ALPHABETS & GLYPHS  
OF AFRICA AND AMERICA.**

By Prof. C. S. RAFINESQUE. Philadelphia. 1832.

LYBIAN.		AMERICAN.		
1. Primitive and Acrostic.		3. Letters of Otolum.		4. 
2. Old Demotic or Tuaric.		4. Glyphs of Otolum.		
Meanings and Names of Letters in No. 1.		Names of Letters in No. 2.		
	1.	2.	3.	
Ear. AIPS.	A.			A
Eye. ESH.	E.			EI
Nose. IFR.	I.			IZ
Tongue. OMBR.	O.			OW
Hand. VULD.	U.			UW
Earth. LAMBD.	L.			IL
Sea. MAH.	M.			IM
Air. NISP.	N.			IN
Fire. RASH.	R.			IR
Sun. BAP.	B.p.			IB
Moon. CEK.	C.k.			UK
Mars. DOR.	D.t.			ID. ET
Mercury GOREG.	G.			IGH
Venus. UAF.	V.f.			UW
Saturn. SIASH.	S.sh.			ES. ISH
Jupiter. THEUE.	T.h.z.			UZ



Rafinesque décrit de multiples espèces végétales, comme la gyroselle pauciflore, *Dodecatheon pulchellum* (à gauche). Grand amateur de chiroptères, il en décrit aussi plusieurs, dont le molosse de Cestoni, *Tadarida teniotis* (à droite).

ce texte se révéla un faux. Rafinesque aurait-il ici été dupé une fois de plus? Il n'en reste pas moins que ses contributions substantielles à l'étude raisonnée des sites archéologiques amérindiens, souvent plagiées par ses successeurs immédiats, sont reconnues de nos jours.

Ce n'est pas tout. S'appuyant sur ses travaux en systématique végétale, et très influencé par le botaniste Michel Adanson, Constantin Rafinesque fut l'un des premiers évolutionnistes importants, ainsi que le souligne Darwin lui-même dans l'historique qu'il a ajouté à des éditions ultérieures de *L'Origine des espèces* (1859). Pour Rafinesque, l'extrême diversité des espèces animales et végétales actuelles procède d'un nombre restreint de formes ancestrales. Bien avant le botaniste néerlandais Hugo De Vries, il emploie le terme «mutations» pour désigner les transformations évolutives. Qui plus est, il s'interroge aussi sur les changements possibles de «tempo» lors du processus évolutif, question qui sera fort débattue tout au long du xx<sup>e</sup> siècle...

## UN LEGS SCIENTIFIQUE CONSIDÉRABLE

Le décès de Rafinesque a fait couler presque autant d'encre que son existence mouvementée. Depuis son retour du Kentucky, il demeura à Philadelphie, l'un des hauts lieux de la vie scientifique et intellectuelle des États-Unis d'alors, où il enseignait et travaillait à de multiples projets d'ouvrages. L'on a souvent écrit qu'il était mort dans un misérable taudis. Il convient de faire un sort à cette légende romanesque: en réalité, si ses revenus avaient

beaucoup diminué, il avait encore les moyens de louer une maison dans un quartier populaire de la ville. C'est là qu'il s'éteignit le 18 septembre 1840, des suites d'un cancer de l'estomac, après avoir été suivi dans ses derniers mois par deux éminents praticiens.

Dans les décennies qui suivirent sa disparition, le legs scientifique de cette personnalité controversée, desservie par son obsession de briller à tout prix, commença à être reconnu. Ainsi, c'est Asa Gray, l'un des maîtres de la botanique américaine, converti à l'évolutionnisme, qui attira l'attention de Darwin sur l'œuvre de Constantin Rafinesque... après l'avoir longtemps dénigrée. Avec le recul, le travail d'inventaire de la biodiversité effectué par le naturaliste franco-américain s'avère colossal: sur les milliers de taxons qu'il a décrits (qui concernaient aussi bien des mousses que des annélides ou des chauves-souris), pas moins de 160 genres et quelque 300 espèces sont encore tenus pour valides aujourd'hui. Quant à ses écrits, ils avoisinent le millier...

Rafinesque apparaît sans aucun doute comme l'un des pionniers majeurs de l'histoire naturelle américaine, aux côtés de William Bartram et Jean-Jacques Audubon. Laissons pour terminer le dernier mot à cet incorrigible optimiste, héritier des Lumières: «Si j'ai souvent devancé mes contemporains dans mes vues et [...] découvertes [...], je les lègue à ceux qui sauront les apprécier, et me rendre la justice que l'on m'a souvent refusée: aux amis des sciences utiles, des peuples opprimés [...] des vertus et de la paix, [...] aux savants éclairés et impartiaux.» ■

## BIBLIOGRAPHIE

N. Woodman, **Pranked by Audubon : C.S. Rafinesque's description of J.-J. Audubon's imaginary Kentucky mammals**, *Archives of Natural History*, vol. 43(1), pp. 95-108, 2016.

C. S. Rafinesque, **Voyages à travers l'Amérique (1802-1840)** (édités par Jean Rafinesque), 2007.

L. Warren, **Constantine Samuel Rafinesque : A voice in the American Wilderness**, University of Kentucky Press, 2004.

C. Boewe (éd.), **Profiles of Rafinesque**, University of Tennessee Press, 2003.

# 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*

# CINQ PÉPITES MATHÉMATIQUES DE JOHN CONWAY

**Le grand mathématicien britannique vient de disparaître. Pour lui rendre hommage, voici un petit échantillon de mathématiques comme les aimait ce magicien des jeux et des nombres.**

## L'AUTEUR



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



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

**L**e 11 avril 2020, John Horton Conway décédait à l'âge de 82 ans du Covid-19 à Princeton, aux États-Unis. Il était le mathématicien qui a été mentionné le plus souvent dans cette rubrique (plus de trente fois). En préparant les articles, je suis tombé à diverses reprises, et à mon grand étonnement, sur un résultat qu'il avait démontré ou une idée importante qu'il avait été le premier à proposer sur le thème retenu. John Conway aimait les questions mathématiques simples et concrètes qui stimulaient sa créativité.

Le meilleur hommage qu'on puisse lui rendre est de montrer le type de mathématiques qui l'émerveillait et le passionnait. Je vais aborder cinq thèmes différents où il est intervenu, mais ce sont plusieurs livres qu'il faudrait pour rendre justice à ce découvreur exceptionnel, capable dans une multitude de domaines aussi bien d'inventer des objets et des problèmes que de résoudre les énigmes les plus récalcitrantes en créant des méthodes que personne n'imaginait.

### L'IRRATIONALITÉ DE $\sqrt{2}$

L'un des plus surprenants et importants résultats mathématiques est l'irrationalité

de  $\sqrt{2}$ , la longueur de la diagonale d'un carré de côté unité:  $\sqrt{2}$  ne peut être exprimé par le quotient  $n/m$  de deux nombres entiers  $n$  et  $m$ . On attribue la découverte de l'irrationalité à Pythagore ou l'un de ses disciples, sans savoir si le raisonnement trouvé était arithmétique ou géométrique. Cette preuve et découverte a profondément troublé les mathématiciens. Ce premier résultat négatif en mathématiques montre que les humains n'inventent pas les lois régissant les nombres, mais les découvrent au cours de leur exploration d'une terre mathématique inconnue.

Il existe de nombreuses démonstrations du résultat, mais la plus instantanée tient en un petit dessin très simple présenté par John Conway dans un article paru en 2006. Il attribuait la découverte de la preuve à un certain Stanley Tennenbaum dont il indiquait qu'il avait abandonné les mathématiques. On peut se demander si ce n'est pas Conway lui-même qui l'a découverte. C'est sans importance, car même s'il n'en est pas l'inventeur, cette preuve donne un exemple parfait de la conception que Conway avait des mathématiques et qu'il a illustrée de cent façons différentes. On en tire aussi qu'il est faux de croire que tout ce qui est simple a déjà été découvert: des idées lumineuses et d'une grande simplicité attendent d'être dévoilées.

## JOHN CONWAY (1937-2020)

# 1

Les domaines de recherche de ce remarquable mathématicien étaient la théorie des groupes, la théorie des nœuds, la géométrie, l'analyse, la théorie des jeux combinatoires, l'algèbre, l'algorithmique et même la physique théorique. Un livre de Siobhan Roberts décrit ce mathématicien à l'imagination sans limite et retrace sa vie (*Genius at Play, The Curious Mind of John Horton Conway*, Bloomsbury, 2015).

Le goût et le talent de Conway l'ont conduit à inventer le remarquable automate cellulaire du « jeu de la vie » dont cinquante ans de travaux n'ont pas épuisé la richesse (voir l'encadré 4).

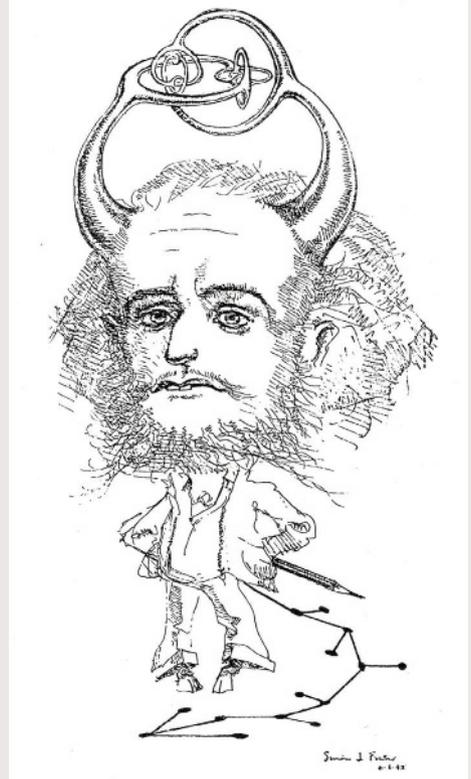
Cet amour des mathématiques pour tous l'a amené à contribuer aux problèmes qui passionnent les amateurs de récréations mathématiques, tels que la célèbre conjecture de Collatz (voir la fin de l'article).

Dans le même esprit, il a aussi imaginé des casse-tête de rangement d'une boîte de cubes qui sont à la fois élégants et ne peuvent être résolus en temps

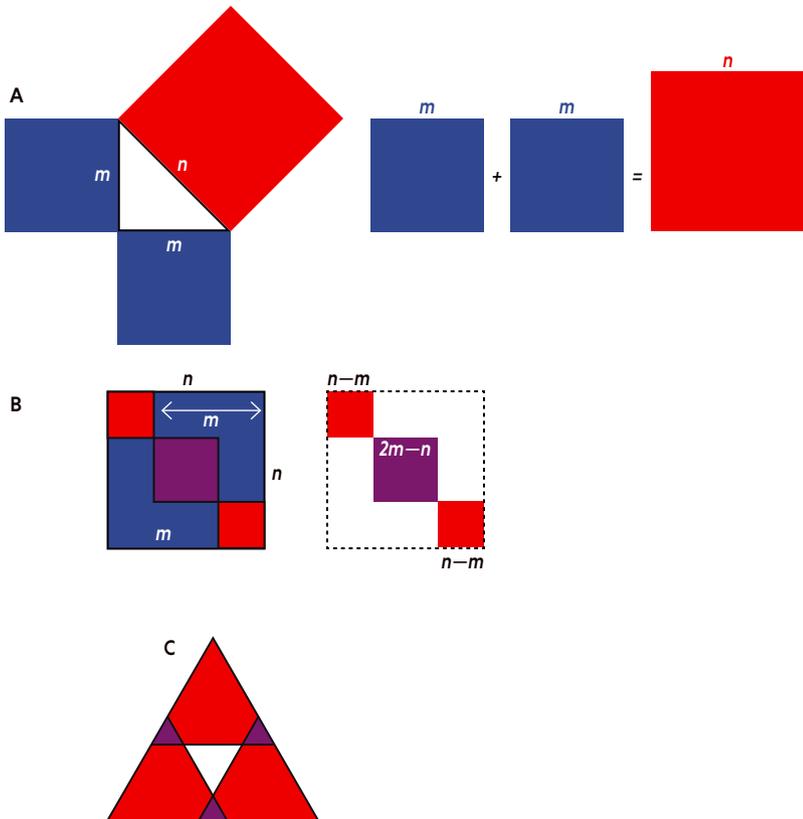
raisonnable que par d'astucieux raisonnements.

D'après lui, sa plus importante contribution est sa conception d'un merveilleux système de nombres, le corps des nombres surréels, qui contient à la fois les entiers, les réels, les nombres transfinis de Cantor et les infinitésimaux, structure que personne n'avait imaginé possible, où tout peut s'additionner, se multiplier, etc.

Ceux qui ont travaillé avec Conway racontent qu'il pensait si vite que, à peine un problème énoncé, le plus souvent il en formulait la solution. Neil Sloane, le maître d'œuvre de la fameuse encyclopédie en ligne des suites numériques (<https://oeis.org>) a écrit une cinquantaine d'articles avec lui. Il décrit leur travail commun : « J'ai collaboré avec beaucoup de gens, mais il était le plus rapide à résoudre un problème. [...] Quand nous travaillions ensemble, notre devise était d'aller aussi loin que n'importe quel homme raisonnable peut le faire, puis de poursuivre largement au-delà. »



Dessin de Simon Fraser représentant Conway couronné d'un remarquable objet topologique, la sphère cornue du mathématicien James Alexander (1888-1971).



Dire que  $\sqrt{2}$  est un quotient  $n/m$  de deux entiers, c'est dire que  $2 = n^2/m^2$  pour deux entiers  $n$  et  $m$  ou encore que  $2m^2 = n^2$ . Il existerait donc un carré de côté entier  $m$  dont le double de l'aire serait égal à celle d'un carré de côté entier  $n$  (figure A ci contre). Nous supposons que le  $m$  de notre dessin est le plus petit entier positif vérifiant cette égalité : l'hypothèse est licite, car quand une propriété est vraie pour certains entiers positifs, il existe nécessairement un plus petit entier qui la vérifie.

En calant les deux carrés bleus dans deux coins opposés du carré rouge, on obtient une nouvelle figure (figure B ci-contre), où les deux coins rouges doivent avoir la même aire que le carré central violet, qui correspond au recouvrement des deux carrés bleus.

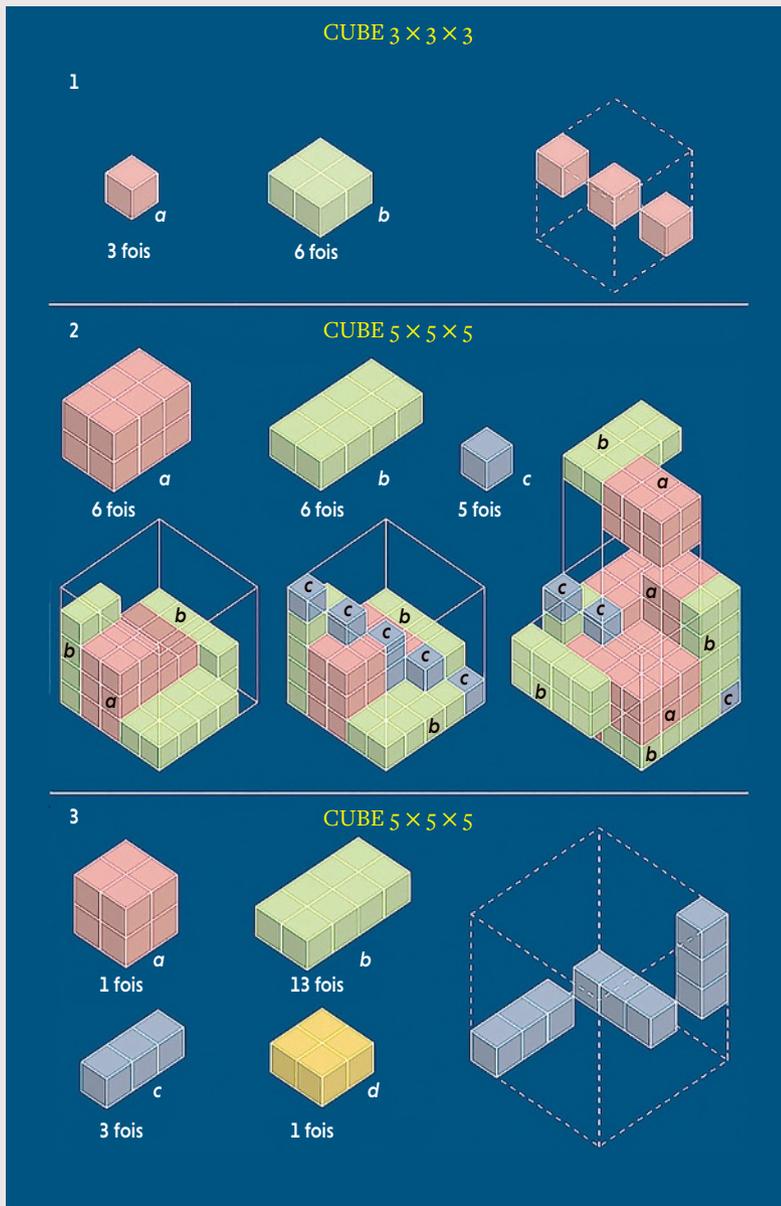
En effet, les deux bleus doivent valoir le rouge (figure A), et donc ce qui n'est pas couvert par les carrés bleus a une aire égale à ce qui est couvert deux fois par les carrés bleus ; on a donc trouvé deux carrés égaux et plus petits (en rouge sur le dessin B) qui, ensemble, ont la même aire qu'un carré plus grand (en violet). Par construction, les nouveaux petits carrés ont chacun pour côté l'entier  $n-m$  et le grand en violet a pour côté l'entier  $n-2(n-m) = 2m-n$ . >

# 2

## RANGEMENTS DE PAVÉS DANS UN CUBE

**J**ohn Conway a imaginé des casse-tête de rangement qui sont à la fois élégants, car n'utilisant que peu de pièces différentes, et assez difficiles... sauf si l'on accepte de raisonner (voir le raisonnement pour le casse-tête 1 dans le texte de l'article). Pour le casse-tête 2, la solution est indiquée en vue éclatée ; pour achever

la construction, il suffit de descendre les structures supérieures puis de placer la plaque verte *b* au-dessus de la plaque rose *a*. Le raisonnement sur la parité nous oblige à placer les cubes unités le long de la diagonale. Pour le casse-tête 3, seul le début de la solution est indiqué.



> C'est donc que le carré initial de côté  $m$  n'était pas le plus petit possible permettant l'égalité géométrique. On a une contradiction et donc l'hypothèse de départ est fautive (raisonnement par l'absurde) :  $\sqrt{2}$  n'est pas un quotient de deux entiers, c'est donc un nombre irrationnel. En transposant, vous pouvez démontrer que  $\sqrt{3}$  est irrationnel (figure C).

### TROIS CASSE-TÊTE DE REMPLISSAGE D'UNE BOÎTE CUBIQUE

Il existe une multitude de casse-tête consistant à ranger dans une boîte, en général un parallélépipède rectangle, des pièces en petit nombre, par exemple 10, qui, elles aussi, sont des parallélépipèdes rectangles. Par tâtonnements, on finit par trouver la solution. Sur un tel sujet, à moins de multiplier les pièces et la variété de leurs formes, il est difficile d'arriver à un problème difficile. De plus, même s'il est amusant de manipuler les pièces jusqu'à arriver à la solution, seuls de petits raisonnements sur la forme des pièces entrent en jeu et ils limitent assez peu le temps de recherche.

John Conway a changé cette situation en imaginant trois casse-tête où, en l'absence de raisonnement, vous risquez de tourner en rond sans jamais réussir à remplir la boîte, alors qu'en menant des considérations astucieuses et ordonnées, vous serez rapidement conduit à la solution.

Le plus simple des trois casse-tête consiste à remplir un cube  $3 \times 3 \times 3$ , avec trois cubes  $1 \times 1 \times 1$  et six parallélépipèdes  $1 \times 2 \times 2$ .

Le raisonnement consiste à prendre en compte la parité. Le cube  $3 \times 3 \times 3$  est composé de trois couches horizontales de forme  $3 \times 3 \times 1$ , donc chacune de volume 9. On peut aussi décomposer le cube  $3 \times 3 \times 3$  en trois parallélépipèdes verticaux  $3 \times 3 \times 1$ , chacun parallèle à une face verticale du cube. En considérant la face verticale perpendiculaire, on a une troisième décomposition du cube en trois parallélépipèdes  $3 \times 3 \times 1$ .

Examinons ces neuf parallélépipèdes. Quand on positionne une forme  $1 \times 2 \times 2$  dans le cube, elle ne peut occuper qu'un nombre pair de cubes d'un de ces neuf parallélépipèdes  $3 \times 3 \times 1$ . Il faut donc que chacun d'eux contienne un des petits cubes  $1 \times 1 \times 1$ , et un seul (sinon, il en faudrait trois dans un même parallélépipède  $3 \times 3 \times 1$ , ce qui empêcherait d'en mettre dans les deux qui sont parallèles). La face supérieure du cube doit donc contenir un carré  $1 \times 1 \times 1$ . Si on le place au centre de la face, on tombe rapidement sur une impasse : l'obligation de placer un autre petit cube juste en dessous, ce qui en placerait deux dans un même paquet  $3 \times 3 \times 1$ . Si on place le petit cube de la face supérieure au milieu d'un côté, on arrive aussi immédiatement à une impasse. Il

faut donc placer le petit cube de la face supérieure dans un coin.

Il en va de même pour la face inférieure dans laquelle un petit cube doit être placé dans un coin, qui ne peut être que celui diamétralement opposé au petit cube de la face supérieure. Le troisième petit cube est alors nécessairement au centre. Le reste s'impose de proche en proche. Notons que ce raisonnement non seulement produit une solution, mais montre aussi qu'aux symétries près, il n'y en a qu'une seule.

Les deux autres puzzles de rangement de Conway sont illustrés dans l'encadré 2 avec des indications pour leur solution. Amusez-vous à trouver les raisonnements qui amènent droit vers le rangement complet.

### LE PROBLÈME DES DEUX SORCIERS

Dans les années 1960, Conway a imaginé un incroyable problème qui, récemment encore, a donné lieu à des discussions et à la publication d'un article par Tanya Khovanova, du MIT (*voir la bibliographie*). En voici l'énoncé:

«Hier soir, j'étais assis derrière deux sorciers dans un bus et j'ai entendu ce qu'ils disaient:

A: J'ai un nombre entier d'enfants, dont les âges sont des entiers non nuls. La somme de ces âges est le numéro de ce bus, et leur produit est mon propre âge.

B: Comme c'est intéressant! Peut-être que si vous me disiez votre âge et le nombre de vos enfants, je pourrais calculer chacun de leurs âges?

A: NON.

B: Parfait, maintenant je sais quel âge vous avez!

La question est: quel est le numéro du bus?»

Précisons que dans le dialogue, le «non» du sorcier A ne signifie pas qu'il refuse de répondre, mais que la connaissance de son âge et du nombre de ses enfants ne permet pas de connaître individuellement leurs âges. Bien sûr, il faut prendre en compte que le sorcier B connaît le numéro du bus. Précisons encore que les sorciers peuvent être très jeunes ou très vieux: il n'y a aucune impossibilité à envisager que l'âge du sorcier A soit 2 ans ou 20 000 ans.

Voici la solution, que je n'ai pu comprendre et vérifier entièrement qu'en m'aidant d'un programme. Je ne peux pas recopier tous les calculs que nécessite la conclusion, mais vous pouvez croire ce que j'affirme ou... refaire tous les calculs omis.

Notons  $a$  l'âge du sorcier A,  $b$  le numéro du bus,  $c$  le nombre de ses enfants. Supposons par exemple que le numéro du bus soit  $b=5$ . Les diverses options sont:

- $c=5$  avec pour âges des enfants 1, 1, 1, 1, 1 et donc  $a=1$ ;

# 3

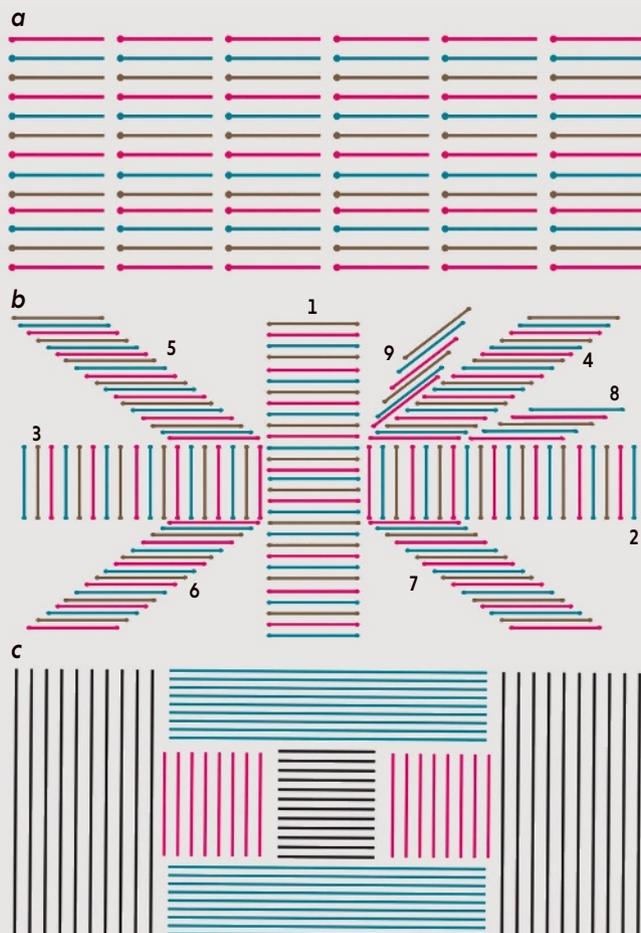
## LES PAVAGES FINS

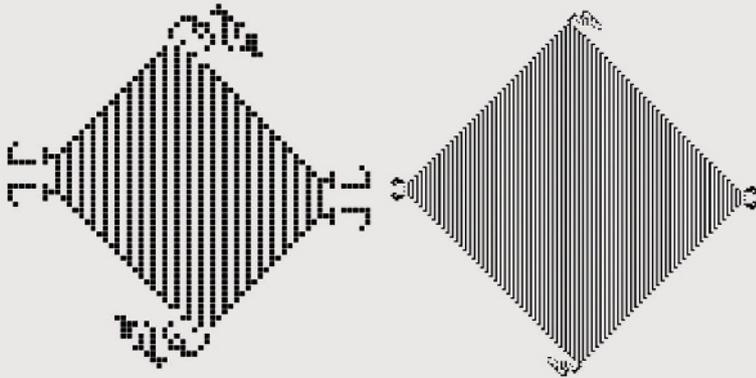
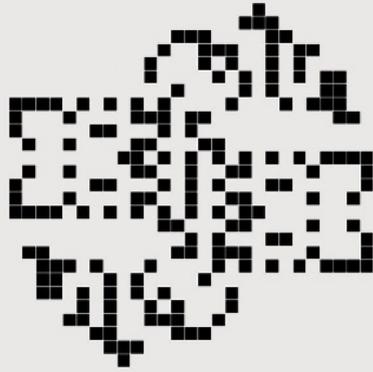
**J**ohn Conway et Hallard Croft ont conçu des pavages du plan avec des segments de droite. La figure a indique comment on réalise un pavage avec des segments semi-ouverts  $[A, B[$  (où le point A est inclus, et le point B est exclu). C'est facile, car, en les mettant bout à bout, on est ramené au pavage évident par des droites.

La figure b illustre la solution pour des segments de même taille fermés  $[A, B]$  (où A et B appartiennent au segment). L'empilement 1 est placé en premier. L'empilement 2 est alors ajouté, mais, bien évidemment, le segment le plus à gauche de cette pile n'est pas retenu.

Pour l'empilement 3, on omet de prendre le segment le plus à droite. Pour les piles obliques qu'on ajoute et qui sont de plus en plus fines, à chaque fois le «premier» segment est omis.

La figure c montre une solution pour des segments ouverts  $]A, B[$  (où A et B sont exclus), de tailles différentes. Les segments du carré central donnent un carré ouvert (ni les côtés ni les sommets du carré ne sont couverts par ce premier empilement). Chaque rectangle obtenu progressivement lors de l'ajout de nouvelles piles est lui aussi ouvert. Avec des segments ouverts de même longueur, il n'y a pas de solution.





## 4

UNE NOUVELLE CONFIGURATION  
DU JEU DE LA VIE

**L**e Jeu de la vie inventé en 1970 par Conway est toujours étudié et tous les problèmes qu'il pose n'ont pas été résolus. Une case du quadrillage carré du plan infini peut être vivante ou morte ; d'une génération à l'autre, une case passe de l'état vivant (*en noir*) à l'état mort (*en blanc*), ou l'inverse, ou reste stable, en fonction de ses huit cases voisines immédiates qui sont mortes ou vivantes.

La règle d'évolution tient en douze mots : naissance si trois voisines vivantes, survie si deux ou trois voisines vivantes. Certaines configurations ayant peu de cellules vivantes au départ s'étendent infiniment. Au mieux, la croissance du nombre de cellules vivantes augmente proportionnellement à  $n^2$  où  $n$  est le numéro de la génération. Au mieux, la densité de cellules vivantes dans une partie stable du plan est  $1/2$ . Le résultat a été

démonstré sur 29 pages en 1997 par Noam Elkies, de l'université Harvard.

L'extraordinaire configuration figurée en haut a été découverte en avril 2020 par Mateusz Naściszewski ([www.conwaylife.com/wiki/Max](http://www.conwaylife.com/wiki/Max)). C'est la plus petite configuration connue qui, une fois lancée, recouvre avec une croissance quadratique le plan d'une population stable de cellules vivantes de densité  $1/2$  (c'est donc le mieux possible en vitesse et en densité). Elle comporte 183 cellules au départ. On a dessiné à des échelles différentes la génération 0, et deux autres générations. On pense qu'il est impossible de faire mieux que 183, mais nul ne sait le démontrer. Notons aussi qu'il existe des configurations qui calculent les nombres premiers ou même qui affichent les unes après les autres des dessins représentant les décimales de  $\pi = 3,14159...$

- > •  $c=4$  avec pour âges des enfants 1, 1, 1, 2 et donc  $a=2$ ;
- $c=3$  avec pour âges des enfants 1, 1, 3 et donc  $a=3$ ;
- $c=3$  avec pour âges des enfants 1, 2, 2 et donc  $a=4$ ;
- $c=2$  avec pour âges des enfants 1, 4 et donc  $a=4$ ;
- $c=2$  avec pour âges des enfants 2, 3 et donc  $a=6$ ;
- $c=1$  avec pour âges des enfants 5 et donc  $a=5$ .

Dans chacun des cas possibles, la connaissance de l'âge du sorcier et du nombre de ses enfants permet de connaître leurs différents âges. Puisque A a répondu NON, et que B connaît le numéro du bus, cela signifie que  $b$  n'est pas égal à 5.

Pour résoudre le problème, on peut de la même façon prendre les numéros de bus possibles un par un et rechercher ceux qui entraîneront que « la connaissance de l'âge du sorcier et du nombre de ses enfants n'entraîne pas la connaissance de chacun des âges des enfants » (propriété P).

En menant les calculs pour  $b=1, 2, 3, \dots, 12$  (comme on vient de le faire pour  $b=5$ ), on découvre que  $b=12$  est le plus petit nombre ayant cette propriété P.

En effet pour  $b=12$  et  $c=4$ , on a deux listes d'âges possibles de même longueur pour les enfants, (2, 2, 2, 6) et (1, 3, 4, 4), qui donnent le même âge pour le sorcier A,  $a=48$ . Il n'existe pas deux autres listes de même longueur et de même produit pour  $b=12$ . Pour  $b=12$ , même en sachant que  $c=4$  et  $a=48$ , il est donc impossible de déduire la liste des âges des enfants. Peut-on en déduire que  $b=12$  est la solution?

Malheureusement non. Pour le numéro de bus  $b=13$ , à cause des listes (1, 6, 6) et (2, 2, 9) qui sont toutes les deux compatibles avec  $a=36$ , le sorcier B ne peut pas non plus tirer de la connaissance de l'âge de A et du nombre de ses enfants les âges de ces derniers.

Savoir que  $b=12$  ne permet pas plus de conclure à l'âge des enfants que savoir que  $b=13$ . Ceux à qui on pose le problème répondent souvent «  $b=12$  » comme si l'énoncé affirmait que la plus petite solution possible pour  $b$  était la bonne. Mais ce n'est pas indiqué dans l'énoncé et sans argument supplémentaire, on ne peut pas choisir entre  $b=12$  et  $b=13$ , ni d'ailleurs entre d'autres valeurs pour  $b$  comme la poursuite du calcul montre qu'il y en a.

Pourtant  $b=12$  est la bonne réponse et sa justification est le côté le plus intéressant et inattendu du problème. Conway a soigneusement rédigé son énoncé et la dernière phrase du sorcier B doit être prise en compte. Après le NON prononcé par A, le sorcier B a ajouté : « Parfait, maintenant je sais quel âge vous avez! » Cela permet d'éliminer  $b=13$ .

En effet, pour  $b=13$ , il y a aussi les deux listes d'âges des enfants (1, 2, 2, 2, 6) et (1, 1, 3, 4, 4) qui donnent l'âge  $a=48$ . Autrement dit, si le bus avait pour numéro 13, B ne pourrait pas déduire de la réponse négative du sorcier A l'âge de A, car celui-ci pourrait être 36 ou 48. Le numéro de bus  $b=13$  est donc à éliminer.

Mais l'élimination de  $b=13$  entraîne l'élimination de  $b=14$  en considérant les séquences d'âges trouvées pour  $b=13$  et en leur ajoutant le nombre 1, ce qui donne (1, 1, 6, 6) et (1, 2, 2, 9) avec  $a=36$  d'une part, et (1, 1, 2, 2, 2, 6) et (1, 1, 1, 3, 4, 4) avec  $a=48$  d'autre part. Selon le même procédé de l'élimination de  $b=14$ , on en tire l'élimination de  $b=15$  et, de proche en proche, de tous les  $b$  supérieurs à 12.

Finalement, seul reste le numéro de bus  $b=12$  avec les séquences (2, 2, 2, 6) et (1, 3, 4, 4), qui donnent l'âge du sorcier A:  $a=48$ .

À la vue de tous les calculs qu'il faut faire pour avoir la solution et dont je n'ai pas recopié le détail qui occupe plusieurs pages, j'avoue que je ne comprends pas comment Conway a pu concevoir ce problème inouï!

### PAVAGES DU PLAN PAR DES SEGMENTS DE DROITE

Paver le plan avec des carrés est facile, et il en est de même avec des triangles équilatéraux ou des hexagones. On peut aussi paver le plan avec des droites: il suffit de les placer toutes côte à côte et parallèles. Il y en aura une infinité non dénombrable, mais ce sera un pavage parfaitement satisfaisant, car chaque point du plan appartiendra à une droite du pavage et à une seule. Voici des questions plus délicates:

- Peut-on paver le plan avec des segments fermés, c'est-à-dire des segments de droite  $[A, B]$  incluant les extrémités?

- Peut-on paver le plan avec des segments ouverts, c'est-à-dire des segments  $]A, B[$  dont on ne retient pas les extrémités?

- Peut-on paver le plan avec des segments semi-ouverts, c'est-à-dire des segments  $]A, B]$  dont on ne retient qu'une seule extrémité?

Réfléchissez à ces questions inhabituelles, mais naturelles. Elles ne sont pas si simples. L'encadré 3 donne les solutions. Dans un magnifique article de 1964, Conway abordait avec un collègue (voir la bibliographie) ce type de questions et bien d'autres, prouvant encore une fois que des questions très simples auxquelles personne ne pense sont de belles occasions de faire des mathématiques... pas tout à fait évidentes.

### L'INDÉCIDABILITÉ DE LA CONJECTURE DE COLLATZ

Le dernier thème intéresse les mathématiciens amateurs autant que les professionnels. Considérons la fonction  $f$  qui, pour les

entiers positifs pairs  $n$  donne  $n/2$ , et qui donne  $3n+1$ , pour les entiers positifs impairs. Partons de l'entier 7 et appliquons  $f$ : on obtient 22, puis en recommençant, 11, puis 34, 17, 52, 26, 13, 40, 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1, 4, 2, 1, etc. Une fois que l'on arrive à 1, on tourne en rond.

Quel que soit l'entier  $n$  de départ, il semble qu'on finisse toujours par arriver à 1 et à tourner en rond. Des calculs par ordinateur ont testé cette propriété, qui est vraie pour tous les  $n$  jusqu'à au moins  $87 \times 2^{60}$  (environ  $10^{20}$ ). On n'a cependant pas réussi à prouver que c'est toujours le cas, ni à trouver de  $n$  initial qui donnerait une suite allant vers l'infini ou aboutissant à un autre cycle que (4, 2, 1).

Une multitude de travaux ont été consacrés au problème (nommé «conjecture de Collatz» ou «conjecture de Syracuse»), dont plusieurs ont été réunis en un livre (voir la bibliographie). La grande simplicité de l'énoncé du problème attire les amateurs, et je reçois régulièrement des propositions de solutions qui, jusqu'à présent, sont soit fausses soit incompréhensibles.

Conway face à un tel défi, aussi simple à énoncer et qui pourtant résiste depuis plus de quatre-vingts ans à toutes les tentatives de résolution, ne pouvait rester indifférent.

En 1972, il a publié un premier article sur le sujet où il propose des problèmes d'une formulation proche dont il démontre l'indécidabilité. Pour certaines valeurs de l'entier de départ, la suite engendrée par la variante de  $f$  ne finit pas par arriver à 1, mais la théorie des ensembles ne peut pas le démontrer. Plus généralement, pour tout système de démonstration  $S$ , il existe un problème de cette catégorie et un point de départ qui n'aboutit pas à 1, ce qui n'est pas démontrable avec les moyens de  $S$ .

En 2013, Conway est revenu sur la question et a donné des arguments de type probabiliste suggérant que le problème de Collatz lui-même échappe au pouvoir des preuves des systèmes d'axiomes utilisés habituellement en mathématiques. Il ne s'agit pas d'une démonstration définitive de l'indécidabilité de la conjecture de Collatz, mais le type d'arguments qu'il propose semble assez sérieusement indiquer que ce n'est pas un hasard si tout le monde bute sur la résolution de la conjecture.

Tout mathématicien rencontre des problèmes qu'il ne réussit pas à résoudre. Conway n'a pas échappé à cette règle générale, mais ses capacités particulières de logicien lui ont en quelque sorte permis de se consoler en prouvant un résultat d'indécidabilité et en élaborant des arguments suggérant que ce problème, si simple à énoncer et qui lui a résisté, continuerait indéfiniment à résister à tous les mathématiciens. ■

## BIBLIOGRAPHIE

J. H. Conway, **On unsettling arithmetic problems**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 120(3), pp. 192-198, 2013.

T. Khovanova, **Conway's Wizards**, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 35, pp. 18-20, 2013 (<https://arxiv.org/pdf/1210.5460.pdf>).

J. H. Conway, **Unpredictable iterations**, *Proceedings of Number Theory Conference*, Boulder, CO, 1972, pp. 49-52; Repris dans : J. Lagarias (ed.), **The Ultimate Challenge : The  $3x + 1$  Problem**, American Mathematical Society, 2010.

J. H. Conway, **The power of mathematics**, dans A. Blackwell & D. MacKay (eds.), *Power*, Cambridge University Press, 2006, pp. 36-50

J. H. Conway et H. T. Croft, **Covering a sphere with congruent great-circle arcs**, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 60(4), pp. 787-800, 1964.

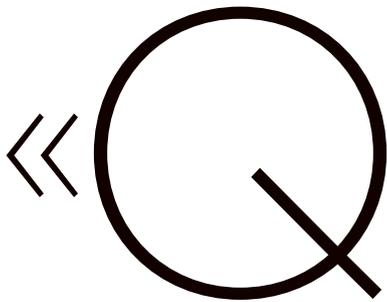
## L'AUTEUR



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

# LE MYSTÈRE DU COQUELICOT DE MONET

Au muséum de Rouen, on découvre pourquoi une espèce de coquelicot porte le nom de Claude Monet. C'est que l'illustre peintre, passionné d'horticulture, vivait entouré de botanistes !



« Que peut-il y avoir à dire, je vous le demande, d'un homme que rien au monde n'intéresse que sa peinture – et aussi son jardin et ses fleurs ? » C'est ainsi que Claude Monet s'interroge à son propos. Et, de fait, le père de l'impressionnisme aime passionnément l'horticulture. De 1883 jusqu'à sa mort en 1926, il aménage avec soin le « Clos Normand », les 96 ares entourant sa propriété de Giverny, dans l'Eure, prenant conseil auprès de professionnels de renom, comme Truffaut et Vilmorin, et d'amis tout aussi épris de plantes que lui, notamment Gustave Caillebotte. Glaïeuls, clématites, capucines, pivoines, passiflores... sortent

de terre, s'épanouissent et se succèdent tout au long de la belle saison. Et l'on trouve aussi des coquelicots dont le nom d'espèce est... *Papaver monetii*.

Pour comprendre l'incursion de Monet dans les sciences botaniques, entrons dans son intimité. À Giverny, il vit avec ses deux enfants, Michel et Jean, nés de son premier mariage avec Camille Doncieux, ainsi qu'avec Alice Raingo, qu'il épouse en 1892. Elle est la veuve (en 1891) d'Ernest Hoschedé, mécène du peintre et premier propriétaire d'*Impression, soleil levant*, qui a abandonné sa famille pour s'exiler en Belgique. Le couple Hoschedé avait six enfants, dont le dernier, Jean-Pierre, né dans un train entre Dax et Biarritz, est probablement le fils naturel de Monet, sa mère étant sa maîtresse depuis longtemps. Parmi la tribu de Giverny, on trouve également Blanche Hoschedé, fille d'Alice, peintre également, au talent reconnu. Georges Clemenceau la surnommait « L'Ange bleu ».

Il faut imaginer cette famille recomposée se promener dans la campagne, Claude et Blanche avec leur matériel de



*Papaver monetii*, un hybride récolté dans le jardin de Monet, à Giverny, dans l'Eure, le 30 juin 1897, et « épinglé » par Jean-Pierre Hoschedé, fils naturel de Claude Monet, et l'abbé Toussaint dans leur herbier.



Le Champ de coquelicots, un champ de *Papaver rhoeas* peint par Claude Monet en 1885.

peintre. Et à leurs côtés, Jean-Pierre et Michel, sensiblement du même âge, herborisent, c'est-à-dire qu'ils recueillent des spécimens de plantes et les conservent dans des herbiers. L'abbé Anatole Toussaint, curé de Giverny, accompagne souvent le groupe et s'adonne lui aussi avec ferveur à cette occupation, très en vogue à l'époque.

C'est plus qu'un passe-temps pour Jean-Pierre Hoschedé et l'abbé Toussaint. Ensemble, ils constituent un herbier de la flore locale et échangent avec les botanistes régionaux. On leur doit une *Flore de Vernon et de la Roche-Guyon*, publiée en 1897. Le fils de Monet sera même membre de la Société botanique de France en 1901. Et ce sont eux qui repéreront le «Coquelicot de Monet» dans le jardin de Giverny. Qu'a-t-il de particulier?

Autour de Giverny, surtout à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, quand les pesticides sont encore absents, les coquelicots abondent.

Ces fleurs, de l'espèce *Papaver rhoeas*, sont celles que l'on distingue dans *Le Champ de coquelicots*, peint par Monet en 1885 (voir la reproduction ci-dessus), dans les environs de Giverny. Celui identifié par Jean-Pierre Hoschedé et l'abbé Toussaint (voir la planche d'herbier page ci-contre) pousse dans le jardin de la maison. Il s'agit d'un hybride né du croisement du *Papaver rhoeas* commun et du pavot tulipe *Papaver glaucum*. Originnaire d'Anatolie, en Turquie, ce dernier a été introduit en France et cultivé par Monet.

Les découvreurs de *Papaver monetii* en distinguent trois variétés notées *A. genuinum*, *B. hirsutum* et *Y. rhœoides*. À l'instar de ceux de *Papaver glaucum*, les pétales internes sont dressés en forme de tulipe, tandis que les sépales sont hérissés comme ceux de *Papaver rhoeas*. Au total, six spécimens ont été récoltés et sont désormais conservés dans différents herbiers, notamment au Muséum national

d'histoire naturelle, à Paris. Ce sont les seuls connus, *Papaver monetii* n'ayant plus jamais été observé par la suite, sans doute en raison de la raréfaction de *Papaver glaucum*, alors même que *Papaver rhoeas* est toujours cultivé à Giverny.

À Rouen, une exposition met en scène le *Papaver monetii* au milieu d'œuvres de Blanche Hoschedé et de Claude Monet et fait revivre au public l'ambiance savante qui régnait à Giverny, entre horticulture et botanique. ■

«L'Herbier secret de Giverny»  
Jusqu'au 15 novembre 2020,  
au Muséum d'histoire naturelle de Rouen.  
<https://bit.ly/RMM-Herbier>



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

## LES AUTEURS



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

# SUCER LA ROUE DANS LE PELOTON

En roulant en file indienne ou groupés, les cyclistes fournissent moins d'efforts: ils subissent une traînée aérodynamique fortement réduite.



Rouler au cœur du peloton nécessite beaucoup moins d'efforts que de rouler à la même vitesse en solitaire.

**L**e coureur cycliste qui s'échappe du peloton, en tête, seul et durant la majeure partie de l'étape est hélas presque systématiquement rattrapé, dans les derniers kilomètres, par ses poursuivants et laissé sur place, à l'agonie... N'est pas Albert Bourlon qui veut, détenteur depuis 1947 du record de la plus longue échappée solitaire victorieuse sur une étape du Tour de France, soit 253 kilomètres. Les cyclistes d'aujourd'hui manqueraient-ils de mollet? La physique, entre études en soufflerie et simulations numériques, incite à plus d'indulgence. Car elle montre que rouler au cœur du peloton ou en file indienne réduit considérablement les efforts à fournir, par rapport à la situation où l'on roule seul.

Tout cycliste amateur en a l'intuition: même sur le plat et sans vent, aller vite

en vélo nécessite beaucoup d'efforts, surtout si l'on ambitionne de rouler à environ 54 kilomètres par heure, soit 15 mètres par seconde, allure communément atteinte par les professionnels du Tour de France.

## LA TRAÎNÉE, ENNEMIE DU CYCLISTE SOLITAIRE

Quelles forces s'opposent à notre mouvement rendent cet effort si difficile? Éliminons d'emblée les frottements des chaîne, pignons, pédalier et moyeux ainsi que les frottements de roulement des pneus sur le sol. Ces forces sont typiquement inférieures à 2 newtons. La résistance à l'avancement est due essentiellement à la force de traînée aérodynamique: à 15 mètres par seconde, même lorsqu'on est couché sur le guidon, cette force représente

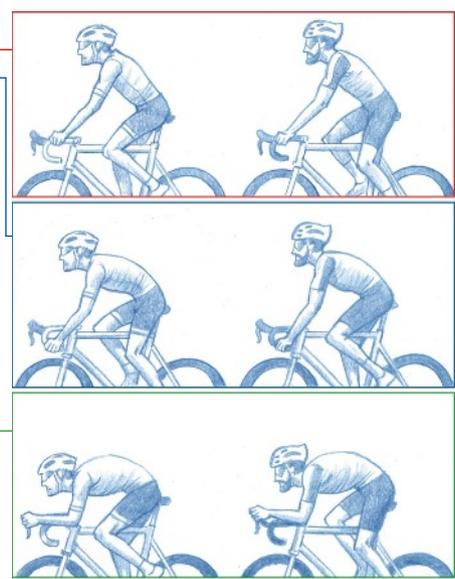
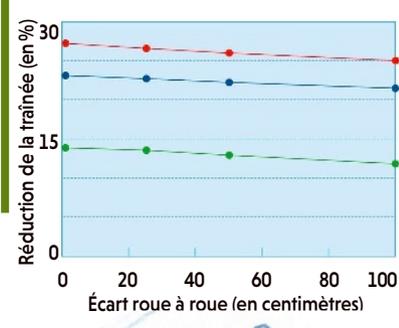
environ 40 newtons, soit le poids d'un objet de 4 kilogrammes.

Pourquoi vaincre une force aussi modeste nous demande-t-il autant d'efforts? Parce qu'on a un effet de levier inverse. Lorsqu'on roule à grande vitesse, chaque tour de pédale nous fait avancer de plus de 10 mètres, soit environ 10 fois plus que la longueur circulaire parcourue par un pied en un tour de pédale (pour les connaisseurs, nous avons considéré un développement de 52×11, des pneus de 700 millimètres et un bras de levier de pédale de 170 millimètres).

Le prix à payer est qu'il faut exercer sur la pédale une force 10 fois supérieure à la traînée aérodynamique, soit 400 newtons en moyenne, c'est-à-dire le poids de 40 kilogrammes. C'est une force énorme, sachant qu'à la vitesse considérée, le cycliste pédale à une cadence de 81 tours



## MOINS DE TRAÎNÉE POUR LE SUCEUR DE ROUE



**Q**uand deux cyclistes se suivent de près en file indienne, le jeu des dépressions à l'arrière et surpressions à l'avant de chacun a pour effet de diminuer la traînée aérodynamique subie. L'effet est plus important pour le second cycliste que pour le premier. Il dépend aussi de l'écart roue à roue entre les deux coureurs, ainsi que de la position, plus ou moins aérodynamique, adoptée sur le vélo.

par minute. La puissance qu'il doit fournir est alors de 600 watts en continu... Presque surhumain!

D'où vient la traînée aérodynamique? Son expression quantitative en donne une idée: elle est proportionnelle au produit de la masse volumique de l'air ambiant par le carré de la vitesse du cycliste et par la surface frontale qu'il présente, vélo compris, à l'écoulement d'air. Tout se passe donc comme si le cycliste devait pousser et mettre en mouvement tout le volume d'air qu'il traverse.

C'est pour cette raison que de nombreux records ont été battus au vélodrome de Mexico, à une altitude de 2250 mètres. L'air y est 20% moins dense qu'au niveau de la mer, ce qui réduit d'autant la traînée. Cela explique aussi que la première chose à faire pour un cycliste qui veut réduire sa traînée est de

diminuer son aire frontale, en se couchant davantage sur son vélo par exemple. En témoigne la position adoptée par les coureurs professionnels lors des contre-la-montre.

Le coefficient de proportionnalité qui intervient dans l'expression de la traînée dépend de la forme plus ou moins aérodynamique du cycliste et de son vélo, mais aussi des détails de l'écoulement de l'air autour d'eux. Des études en soufflerie et des simulations numériques, en particulier celles de l'équipe de Bert Blocken, à l'université de technologie d'Eindhoven, aux Pays-Bas, ont peu à peu révélé ces écoulements très complexes.

Il ressort de ces travaux que le mouvement du cycliste crée une surpression de l'air devant lui et une dépression derrière lui, les deux contribuant à le freiner.

De plus, le cycliste entraîne de l'air en mouvement sur plusieurs mètres dans son sillage.

### UN EFFET D'ASPIRATION

La dépression à l'arrière du cycliste est un phénomène commun à tous les bolides en mouvement et aux voitures de course en particulier. Elle est à l'origine dans ce cas de ce que l'on appelle l'«aspiration»: en se calant dans le sillage de la voiture de devant, le pilote bénéficie de cette dépression pour gagner plus de vitesse avec une même >

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



> puissance de moteur disponible, ce qui lui permet de dépasser son concurrent.

En vélo, lorsqu'un cycliste se cale dans le sillage d'un autre pour lui «sucer la roue», la dépression située derrière ce pré-décesseur réduit la surpression qu'il crée lui-même. La traînée aérodynamique en est réduite de plus de 20% pour un cycliste en position semi-couchée, y compris lorsque les vélos sont séparés de 1 mètre.

Et comme la dépression à l'arrière du cycliste de tête est réduite par la surpression créée par son successeur, la traînée qu'il subit l'est aussi. Ce gain est faible, de l'ordre de 1,5% pour 10 centimètres d'écart roue à roue, le même que procure à un cycliste une voiture qui le suit à 5 mètres. Un gain faible, mais pas sans conséquence: 1,5% de réduction de traînée à 15 mètres par seconde permet de parcourir 20 kilomètres en 10 secondes de moins!

Cet effet signifie que dans un contre-la-montre, une voiture peut avantager un coureur si elle le suit de trop près. Le choix de l'Union cycliste internationale de 10 mètres comme distance réglementaire, plutôt motivé par des raisons de sécurité, assure ainsi *a posteriori* l'équité du contre-la-montre, l'effet de la voiture sur la traînée étant négligeable à cette distance.

### UNE RÉDUCTION DE LA TRAÎNÉE QUI PEUT DÉPASSER 90%

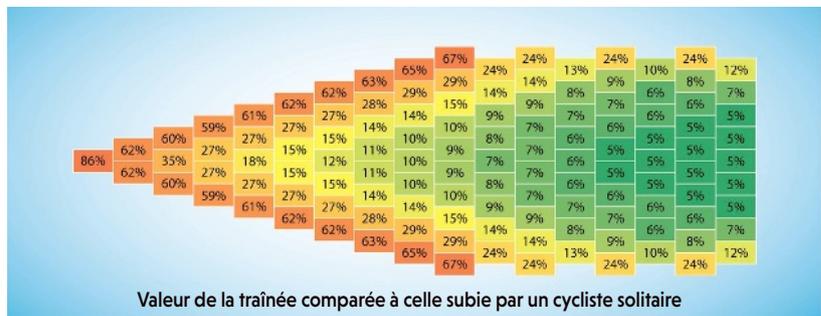
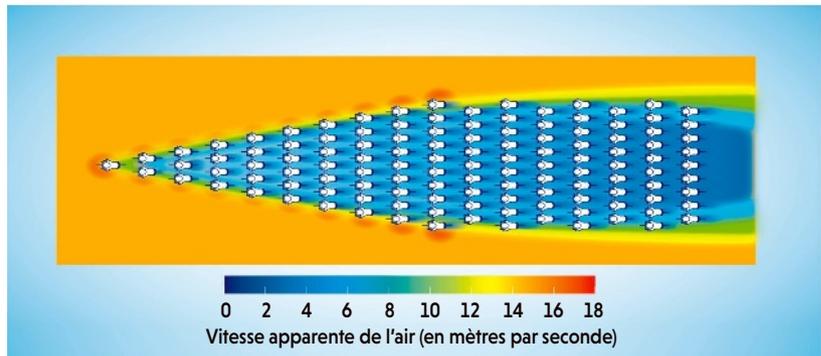
Revenons à nos cyclistes et continuons à en ajouter jusqu'à ce qu'ils soient huit, effectif typique d'un contre-la-montre par équipe. On peut remarquer qu'ils roulent en file indienne, et il y a de bonnes raisons à cela. En effet, à 0,5 mètre d'écart roue à roue entre les coureurs, on obtient des réductions de traînée encore plus élevées qu'en binôme: 37% pour le deuxième dans la file et plus de 55% à partir du quatrième. Sur l'ensemble du groupe, la traînée est ainsi réduite en moyenne de 45% par rapport à la situation où chacun court individuellement.

Seul le cycliste de tête ne bénéficie que d'une réduction marginale, ce qui explique que les coureurs se relaient dans la file pour partager plus équitablement l'effort sur la durée de la course. En tout cas, si tout le monde joue le jeu, partir en petit groupe améliore sensiblement la possibilité de mener au bout une échappée.

Nous pouvons maintenant changer d'échelle et considérer un peloton entier. C'est ce qu'ont fait en 2018 Bert Blocken et ses collègues en étudiant, par

## UN CŒUR DE PELOTON TRÈS CONFORTABLE

L'équipe de Bert Blocken, aux Pays-Bas, a effectué des études en soufflerie sur modèle réduit et des simulations numériques d'un peloton composé de 121 cyclistes. Elles révèlent une réduction considérable de la vitesse apparente de l'air (*figure du haut*) et donc de la traînée aérodynamique (*figure du bas*) pour les coureurs se trouvant au cœur du peloton. Les résultats présentés ici sont relatifs à un peloton dense roulant à 15 mètres par seconde (environ 54 kilomètres par heure).



simulation numérique et en soufflerie avec un modèle réduit à l'échelle un quart, un groupe de 121 cyclistes plus ou moins dense. Les tendances précédentes sont amplifiées (*voir l'encadré ci-dessus*): la traînée est réduite de 14% pour le coureur en tête, de près de 40% pour les coureurs sur les côtés, et de 94% au cœur du peloton!

Il s'ensuit qu'au cœur du peloton, un cycliste a l'impression de rouler à 3,7 mètres par seconde, soit 13 kilomètres par heure, une allure de promenade familiale... Évidemment, choisir sa place dans le peloton n'est pas uniquement une question d'efforts énergétiques. Plus on est en queue, plus on est sensible aux effets d'accordéon provoqués par des accélérations en tête ou aux éventuelles chutes. C'est pourquoi les leaders du Tour préfèrent rester dans les premiers rangs, entourés de leurs équipiers: la réduction de traînée demeure très importante (80%), mais il leur est plus facile de réagir à une accélération soudaine des adversaires. ■

### BIBLIOGRAPHIE

B. Blocken et al., **Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing**, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, pp. 319-337, 2018.

B. Blocken et al., **CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists**, *Computers & Fluids*, vol. 71, pp. 435-445, 2013.

P. D. Soden et B. A. Adeyefa, **Forces applied to a bicycle during normal cycling**, *Journal of Biomechanics*, vol. 12(7), pp. 527-541, 1979.

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!**



N° 514 (août 20)  
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)  
réf. PL513



N° 512 (juin 20)  
réf. PL512



N° 511 (mai 20)  
réf. PL511



N° 510 (avril 20)  
réf. PL510



N° 509 (mars 20)  
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)  
réf. PL508



N° 507 (jan 20)  
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)  
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)  
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)  
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)  
réf. PL503

À retourner accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour La Science – 26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr

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

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

1<sup>er</sup> réf. \_\_\_\_\_ 01 x 9,90 € = 9,90 €  
 2<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €  
 3<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €  
 4<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €  
 5<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €  
 6<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,90 € = \_\_\_\_\_ €

**TOTAL À RÉGLER** \_\_\_\_\_ €

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

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour La Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

**2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES**

M.  Mme  
 Nom : .....  
 Prénom : .....  
 Adresse : .....  
 Code postal \_\_\_\_\_ Ville : .....  
 Téléphone \_\_\_\_\_  
 J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science  OUI  NON

**3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT**

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



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**

## L'AUTEUR



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

# L'EAU, MOTEUR DE L'ÉVOLUTION

**Pas de vie sans eau, certes, mais pas d'eau sans vie et pas de Terre active sans eau... Biosphère, hydrosphère et lithosphère sont bien plus intriquées qu'on ne le pensait.**

**Q**ue l'eau soit indispensable à la vie est une évidence depuis longtemps. De tous les organismes vivants connus, il n'en est pas un qui n'en contienne pas. Même les tardigrades, de minuscules animaux capables de rester plusieurs dizaines d'années en dessiccation complète, conservent 3% de leur eau. Depuis longtemps, il ne fait aucun doute que seule une planète présentant à sa surface de l'eau liquide a pu héberger une telle vie organique. En revanche, ce n'est que grâce à des travaux récents de géologues et géophysiciens que l'on a pu se convaincre de l'existence d'une interdépendance bien plus forte de l'eau, la Terre et la vie – et même de son évolution.

## LA LEÇON DE MARS

Ce n'est pas tout d'avoir de l'eau, il faut la retenir. Les différentes missions sur Mars ont révélé qu'à une lointaine époque, il y a 4 milliards d'années, cet

astre était aussi une planète bleue. On y a trouvé du sable, des roches oxydées, des roches agglomérées dans le lit d'une ancienne rivière... De l'eau coulait sur Mars. Vraisemblablement, pendant plusieurs millions d'années, un océan a couvert 20% de sa surface dans l'hémisphère nord. Puis les rivières se sont tarées, les mers évaporées. La température a chuté.

En fait, la Terre et Mars étaient deux planètes jumelles dont les dynamiques ont divergé rapidement. Comme la Terre, Mars a eu un cœur en fusion: on a trouvé d'anciennes roches qui ont enregistré une de ses manifestations – un puissant champ magnétique. Mais Mars était condamnée par sa petite taille – deux fois plus petite et dix fois moins massive que la Terre. Son noyau s'est vite refroidi, ce dont témoigne le fort déclin du champ magnétique enregistré dans des roches remontant à 500 millions d'années après la formation de la planète.

Privée de son champ magnétique protecteur, l'atmosphère martienne s'est évaporée dans l'espace, arrachée par le

L'eau occupe 71% de la surface terrestre. Au total (en surface, à l'intérieur et dans l'atmosphère), la Terre compte environ 1 386 millions de kilomètres cubes d'eau.



**Terre**  
Diamètre équatorial: 12 756 km  
Distance au Soleil: environ  
150 millions de km  
Période de révolution: 365,26 jours



### Mars

Diamètre équatorial : 6 792 km  
Distance au Soleil : environ  
227 millions de km  
Période de révolution : 686,98 jours

## EN CHIFFRES

# 98 %

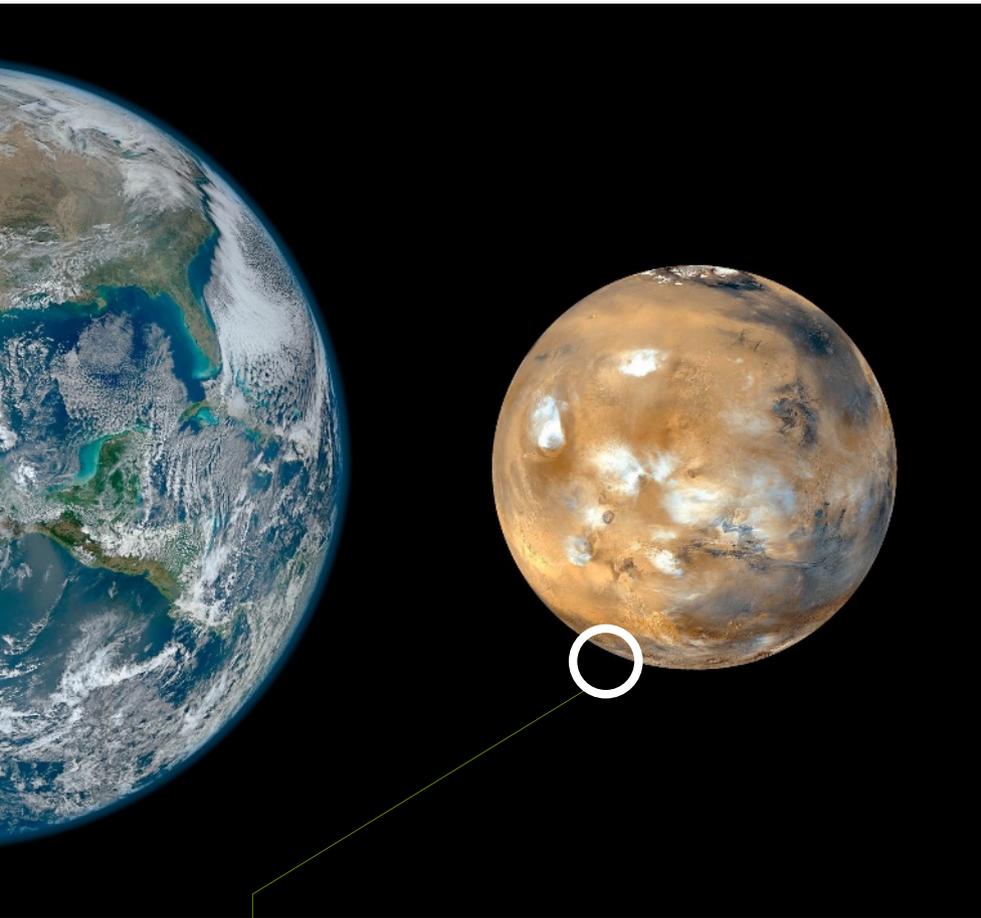
Le corps humain est composé de 65% d'eau : un homme de 70 kilogrammes contient 45 litres d'eau. Mais chez la plupart des méduses, la proportion d'eau monte à 98%. De tels animaux peuvent être vus comme de l'eau structurée par quelques molécules organiques.

# 1 338 millions

Le volume des mers et océans est d'environ 1 338 millions de kilomètres cubes d'eau, soit l'équivalent de quelque 535 200 piscines olympiques.

# 24

La glace VII remontée dans une inclusion de diamant provenant de 600 kilomètres de profondeur est restée à une pression de 24 gigapascals ( $2,4 \times 10^8$  bars). À titre comparatif, la pression dans la fosse des Mariannes, à 10 kilomètres de profondeur dans l'océan Pacifique, est de 100 mégapascals (1 000 bars), et de 380 gigapascals ( $3,8 \times 10^8$  bars) au centre de la Terre.



On estime que dans sa jeunesse, il y a environ 4 milliards d'années, Mars comportait au moins 20 millions de kilomètres cubes d'eau. La planète aurait perdu 87% de son eau dans l'espace.

vent solaire à haute énergie. La Terre a failli subir le même sort. En effet, dans la haute atmosphère, les molécules de dihydrogène se séparent en deux atomes d'hydrogène sous l'effet du vent solaire. Ces derniers, très légers, sont rendus si rapides par l'agitation thermique que l'attraction terrestre ne peut les retenir et ils s'échappent dans l'espace.

### GARDER SON EAU

On estime que cet effet, nommé « échappement de Jeans », est responsable d'environ 10 à 40% de la fuite actuelle d'hydrogène de la Terre. Aujourd'hui, cette fuite reste faible, car le principal gaz porteur d'hydrogène, la

vapeur d'eau, se condense dans la basse atmosphère et retombe sous forme de précipitations.

Mais à la suite de l'oxygénation massive de l'atmosphère, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, attribuée en partie à l'émergence d'organismes photosynthétiques (des cyanobactéries), c'est du dihydrogène, plus léger, qui a été produit en quantité : le dioxygène de l'air a massivement oxydé le fer des roches basaltiques, et l'eau et le dioxyde de carbone ont réagi avec l'oxyde ferreux ainsi formé. Cette réaction a cassé les molécules d'eau et, tandis que l'oxygène était capté dans des carbonates (de sodium, potassium, calcium...), du dihydrogène s'est libéré et aurait dû quitter l'atmosphère terrestre. Des géologues ont calculé qu'un tel processus aurait épuisé l'eau terrestre en un milliard d'années. Mais rien de tel n'est arrivé, car les organismes photosynthétiques remettaient dans l'atmosphère de l'oxygène qui, en se combinant à l'hydrogène libre, a reformé des molécules d'eau.

Ainsi, si la présence d'eau liquide sur la planète Terre a rendu possible l'apparition de la vie, ce sont bel et bien des organismes photosynthétiques qui ont permis la conservation des océans et annihilé un funeste destin martien. Ce mécanisme s'est même probablement mis en place très tôt dans l'histoire terrestre, car des stromatolithes – des roches calcaires que construisent les cyanobactéries – attestent de la présence de



Hervé Le Guyader a récemment publié : **Biodiversité, le pari de l'espoir**, (Le Pommier, 2020).

> ces organismes il y a au moins 3,5 milliards d'années, c'est-à-dire peu après le refroidissement du globe et la fin du grand bombardement tardif d'astéroïdes.

### DE L'EAU DANS UN DIAMANT

Pas de vie sans eau et pas d'eau pérenne sans vie, donc. Mais ce n'est pas tout, car on s'aperçoit que l'eau est aussi indispensable à l'activité de la Terre. La tectonique des plaques semble être une originalité de la dynamique terrestre. Entraînés par des courants de convection du manteau, la croûte lithosphérique et les continents se déplacent de quelques centimètres par an, ce qui est considérable à l'échelle des temps géologiques. Depuis cette découverte il y a un demi-siècle, les géologues ont reconstitué l'histoire de cette dérive des continents qui a continuellement modelé la surface terrestre. Par exemple, après la fragmentation du continent du Gondwana, à partir du Jurassique supérieur (il y a entre 161 et 145 millions d'années), l'Inde a migré et, entrant en collision avec l'Asie il y a 45 millions d'années, a provoqué la surrection de l'Himalaya.

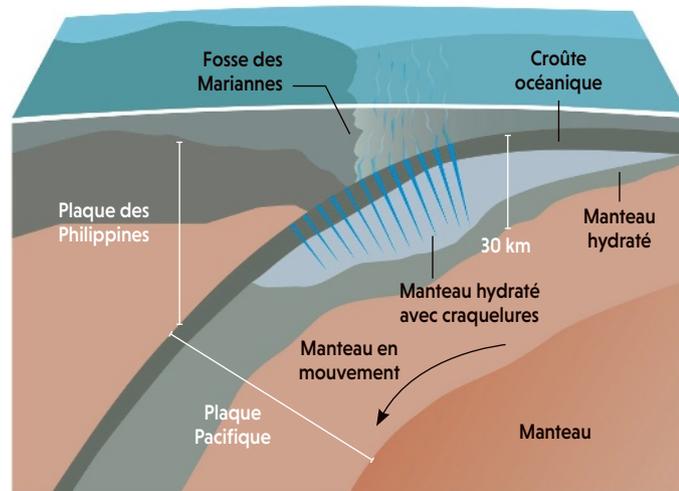
Or, dès 1990, en comparant Vénus et la Terre, deux géologues de l'université de Newcastle, au Royaume-Uni, Z. U. Mian et D. C. Tozer, ont avancé que, sans eau, il n'y aurait pas de tectonique des plaques, car celle-ci, en hydratant les roches, lubrifie les plaques lithosphériques, qui peuvent alors coulisser. De nombreuses études de mécanique et de rhéologie se sont ensuivies. Toutes ont appuyé cette première conclusion.

Si les plaques lithosphériques sont hydratées, une importante masse d'eau doit être entraînée dans le manteau. Quelle quantité? Suivant quel cycle? Car une partie de cette eau revient à la surface lors des éruptions volcaniques. En 2012, Marc Hirschmann et David Kohlstedt, de l'université du Minnesota, ont avancé une première estimation. Ils ont calculé que le manteau terrestre contiendrait au moins 2,5 fois la masse d'eau des mers et océans.

Par ailleurs, deux études parues en 2018 donnent un nouvel éclairage. L'équipe réunie par Oliver Tschauner, de l'université du Nevada, a décelé, dans un diamant, de l'eau sous une forme cristalline particulière, la glace VII. Or cette dernière n'apparaît que sous une formidable pression. D'après les caractéristiques spectroscopiques de l'inclusion de glace VII et du diamant, il s'agirait des restes d'un fluide aqueux qui aurait été piégé sous forme liquide dans le diamant

## PAS DE TECTONIQUE SANS EAU

**L**ors de la subduction de la plaque Pacifique sous la plaque des Philippines au niveau de la fosse des Mariannes, l'eau migre par les craquelures et réagit avec les minéraux du manteau pour former des régions hydratées qui sont entraînées dans les profondeurs de la Terre. La plaque Pacifique contient ainsi bien plus d'eau qu'on ne le pensait.



durant sa croissance, à une profondeur de plus de 600 kilomètres, puis aurait cristallisé au cours de la remontée du diamant. Cette inclusion prouve donc la présence d'eau à la limite du manteau supérieur et du manteau inférieur, une région si proche du noyau qu'on ne pensait pas y déceler d'eau.

Parallèlement, l'équipe de Chen Cai, de l'université Washington à Saint-Louis, aux États-Unis, a réussi à mesurer la quantité d'eau entraînée dans le manteau au niveau de la zone de subduction de la fosse des Mariannes, près de l'île de Guam, à l'ouest de l'océan Pacifique: le flux est trois fois supérieur à celui antérieurement estimé – un argument de poids en faveur d'un rôle clé de l'eau dans la tectonique des plaques.

Ainsi, l'eau, nécessaire à la vie, l'est aussi pour la dérive des continents. Or cette dynamique autorise un perpétuel changement des conditions physicochimiques de la Terre propice à l'évolution biologique: des continents se sont divisés, d'autres se sont rapprochés, de nouveaux courants océaniques sont apparus à mesure que le Gondwana se scindait. Tous ces éléments ont créé une diversité d'environnements qui a favorisé la diversité du vivant. Et ce fragile équilibre se poursuit... tant que le Soleil ne brille pas encore trop. ■

### BIBLIOGRAPHIE

C. Cai et al., **Water input into the Mariana subduction zone estimated from ocean-bottom seismic data**, *Nature*, vol. 563, pp. 389-392, 2018.

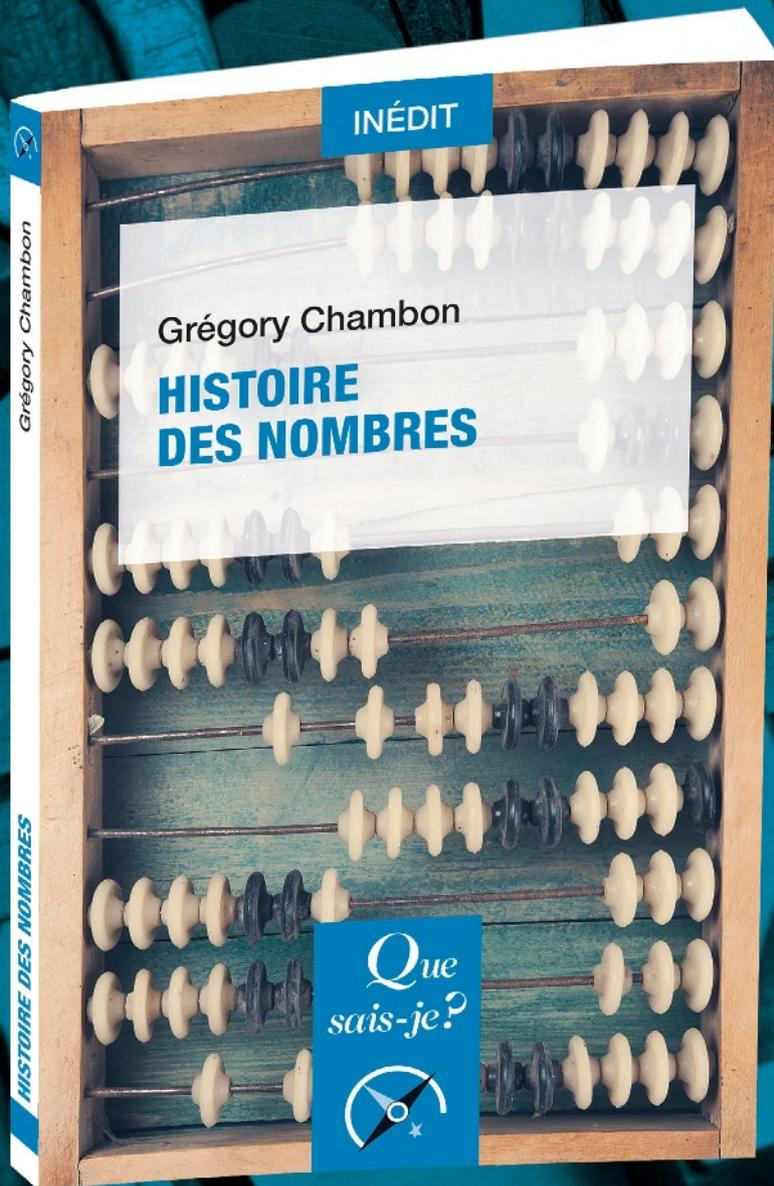
O. Tschauner et al., **Ice-VII inclusions in diamonds: Evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle**, *Science*, vol. 359, pp. 1136-1139, 2018.

M. Hirschmann et D. Kohlstedt, **Water in Earth's mantle**, *Physics Today*, vol. 65(3), pp. 40-45, 2012.

D. Catling et K. Zahnle, **Comment les planètes perdent leur atmosphère**, *Pour la Science*, n° 383, pp. 32-39, septembre 2009.

Z. U. Mian & D. C. Tozer, **No water, no plate tectonics: Convective heat transfer and the planetary surfaces of Venus and Earth**, *Terra Nova*, vol. 2, pp. 455-459, 1990.

# DRÔLES DE NUMÉROS!



EN LIBRAIRIE

*Que  
sais-je?*

Suivez-nous  
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com

## L'AUTEUR



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

# LA TENDANCE EN SCIENCES DU GOÛT

De nombreux travaux récents en sciences du goût portent sur la physicochimie des odeurs et des saveurs, ainsi que sur le lien entre la structure moléculaire des composés et les goûts induits.

Ces mois-ci, les revues scientifiques regorgent d'articles consacrés aux saveurs et aux odeurs. Il y a à cela deux raisons. D'une part, des méthodes modernes d'analyse chimique identifient les composés odorants des ingrédients alimentaires, et l'on a ainsi appris à connaître l'odeur du durian (fruit asiatique à l'odeur repoussante), de la myrtille, de la bière, du jus d'orange, du fenouil... On connaît aujourd'hui environ 7500 composés odorants dans les ingrédients culinaires (fruits, légumes, viandes, poissons...) parmi les quelque 10000 estimés.

D'autre part, l'industrie alimentaire a voulu faire mieux que les classiques tablettes de bouillon pleines de monoglutamate de sodium, et a recherché des goûts plus subtils; les chercheurs ont notamment trouvé que des composés de la famille des inositides potentialisent l'action de l'ion glutamate.

On affuble certains goûts, tels ceux de l'œuf, de la viande cuite, de l'ail ou de la chanterelle, de noms japonais (umami, kokumi...) qui recouvrent notre méconnaissance des récepteurs des saveurs et le lobbying de sociétés qui vendent de tels composés à l'industrie alimentaire.

Parmi les travaux récents, ceux qui explorent des solutions modèles où l'on chauffe de la thiamine (la vitamine B1) ou des acides aminés tels que l'alanine ont mis au jour des composés sans saveur qui augmentent les saveurs salées, sucrées ou de type viande. Le chauffage de créatinine (un déchet métabolique présent notamment dans les viandes) et de sucres a le même effet. Avec de la cystéine (un acide aminé), on arrive aussi à de nouveaux composés sapides, ou qui modulent la saveur d'autres composés. S'enchaînent

Les méthodes modernes d'analyse chimique des aliments révèlent non seulement l'odeur de la chanterelle mais aussi sa saveur originale, due notamment à des acides dérivés de lipides.



aujourd'hui des études qui établissent des corrélations entre les activités biologiques (la saveur, notamment) des composés et leur structure moléculaire.

Un autre exemple de travail récent est celui de Verena Karolin Mittermeier, de l'université technique de Munich, et ses collègues (*Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 68(20), pp. 5741-5751, 2020). Ces chercheurs ont étudié les chanterelles, champignons dont on apprécie à la fois le piquant original, l'odeur délicate (abricot), la saveur un peu amère et épicée... et le goût durable et complexe. Leurs analyses chimiques, associées à des explorations gustatives des fractions séparées, ont révélé la présence d'acides octadécadiène-12-ynoïques et d'acides acétyléniques, promoteurs de goûts.

L'identification et la connaissance de la structure moléculaire de tels composés permettent d'envisager soit des synthèses chimiques, soit des fermentations qui en produiraient, et l'on maîtriserait alors les utilisations de ces composés. Notamment, la découverte de la biosynthèse de ces acides par des mécanismes de peroxydation des lipides indique des voies de production simples pour des utilisations alimentaires évidentes.

Mais les études des saveurs ne s'arrêtent pas à l'hédonisme: les sociétés savantes agricoles du monde entier ont bien identifié l'importance des

légumineuses, plantes qui produisent des protéines, pour une alimentation humaine durable. Ces végétaux ont l'inconvénient de présenter parfois de l'amertume (comme c'est le cas du pois), et l'identification moléculaire des composés amers devrait conduire à des programmes guidés de sélection, en vue de désamérisation. Là encore, une étude récente, avec les mêmes techniques analytiques, vient de retrouver dans les composés amers des dérivés de lipides, en plus des saponines déjà connues.

Et les chimistes de poursuivre avec la bière, le café... On n'a pas fini de voir paraître des articles sur ce thème! ■



## LA RECETTE

### UN GOÛT DE CAFÉ SANS SON AMERTUME

- 1 Dans un bocal fermé, rempli d'une huile neutre, mettre du café torréfié et moulu. Stocker au frais et à l'obscurité (pour éviter le rancissement) pendant une semaine.
- 2 Dans un cul-de-poule, mettre un blanc d'œuf, puis ajouter l'huile parfumée au café en fouettant, comme pour une mayonnaise.
- 3 Emplir un verre à cocktail de cette émulsion jusqu'au tiers, et passer au four à microondes pendant 30 secondes environ.
- 4 Verser une dose de whisky sur ce « gibbs » (mélange fouetté d'huile et de blanc d'œuf).
- 5 Dans un siphon, mettre un expresso froid et un blanc d'œuf, secouer puis foisonner le mélange pour finir d'emplir le verre.

# L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

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

**3,99 €**



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

## Dans la collection *Thema* découvrez aussi



**Commandez et téléchargez  
les numéros en pdf**

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

 **[boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html](https://boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html)**

# A

## PICORER



Retrouvez tous  
nos articles sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

P.80

## PAVAGES

Il est facile de recouvrir le plan avec des carrés, des triangles équilatéraux ou des hexagones réguliers. John Conway, récemment disparu, avait démontré qu'on peut aussi le faire avec des segments de droite !

P.48

## SPALLATION

Quand une cible, de tungstène par exemple, est bombardée de protons de haute énergie, ces derniers arrachent des neutrons ou des protons aux noyaux atomiques du matériau. Ces réactions dites « de spallation » (de l'anglais *spall*, « éclater ») engendrent aussi des particules instables, notamment des pions qui se désintègrent en émettant des neutrinos. Les physiciens produisent ainsi ces particules pour les étudier.

P.7

« Les effets observés de perturbateurs endocriniens des bisphénols S, F, AF et AP indiquent qu'il est impératif de se tourner vers d'autres molécules de remplacement du bisphénol A. Reste à trouver lesquelles... »

PASCAL COUMAILLEAU  
Université Rennes 1 et Irset

P.92

## 65%

C'est à peu près la part que représente, en masse, l'eau dans le corps humain. Cette proportion varie d'une espèce à l'autre. Chez la plupart des méduses, elle atteint 98 % !

P.88

## SUCEURS DE ROUE

Pourquoi les coureurs du Tour de France se serrent-ils autant dans le peloton ? Pour réduire le plus possible la traînée aérodynamique, c'est-à-dire la force que leur oppose la résistance de l'air. Au cœur du peloton, cette traînée est réduite de 94 % par rapport à celle qu'endure un cycliste courant seul.

P.66

## PRÉVISIONS

En 1990, pour produire des bulletins météorologiques ayant 80 % de chance d'être exacts, il fallait se limiter à un horizon de trois jours. Aujourd'hui, les prévisions à sept jours se sont hissées au même niveau de précision. Et pas seulement grâce à des ordinateurs plus puissants...

P.96

## 7 500

Grâce aux méthodes modernes d'analyse chimique, les scientifiques ont identifié à ce jour environ 7 500 composés odorants dans les ingrédients culinaires (fruits, légumes, viandes, poissons, laitages...). On estime le nombre total de ces composés à quelque 10 000.

# BRAINCAST

La voix des neurones

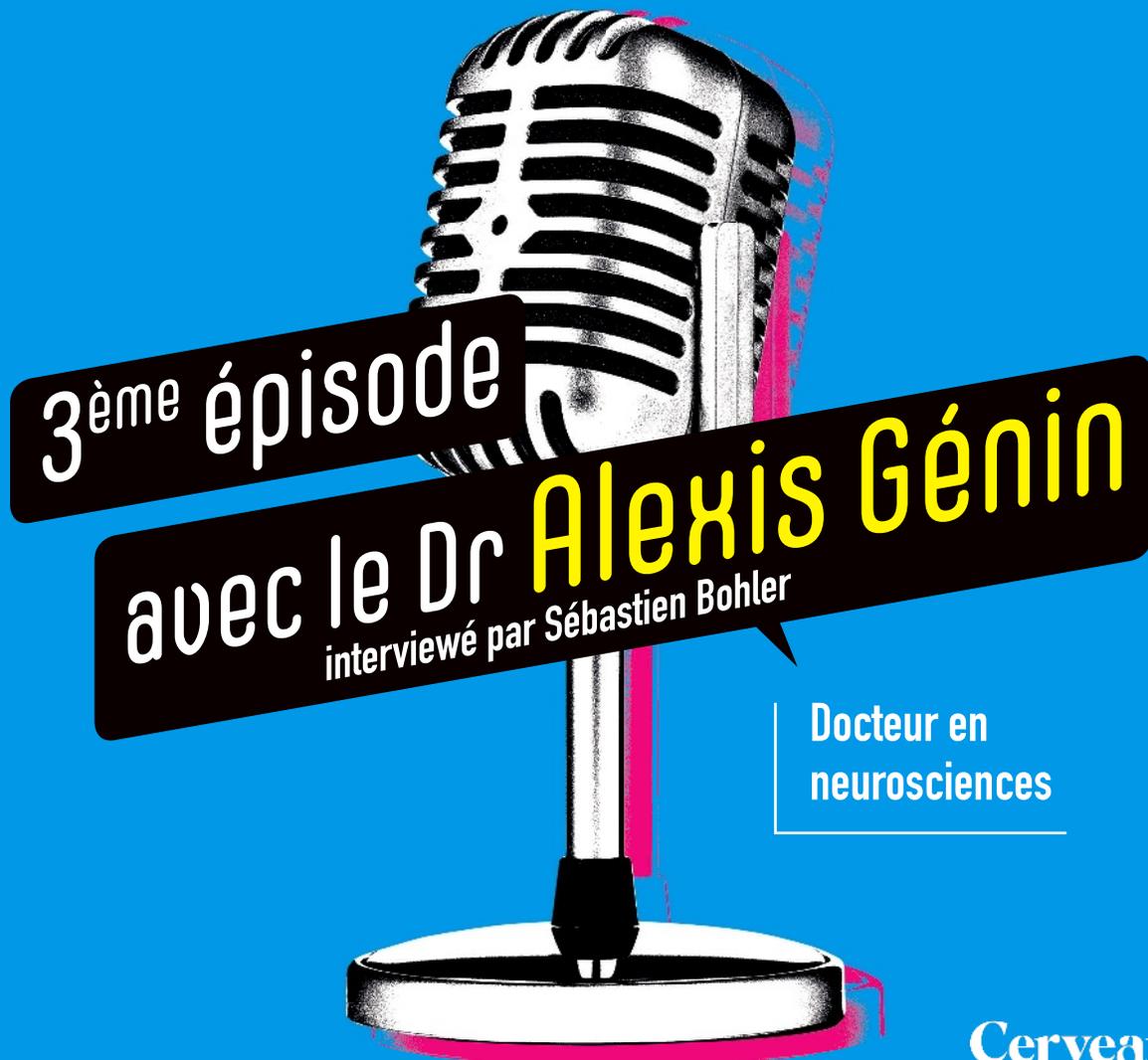
Le podcast de *Cerveau & Psycho*

**en partenariat avec l'Institut du Cerveau**

3<sup>ème</sup> épisode

**Quand la recherche inspire  
l'innovation thérapeutique**

[www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/](http://www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/)

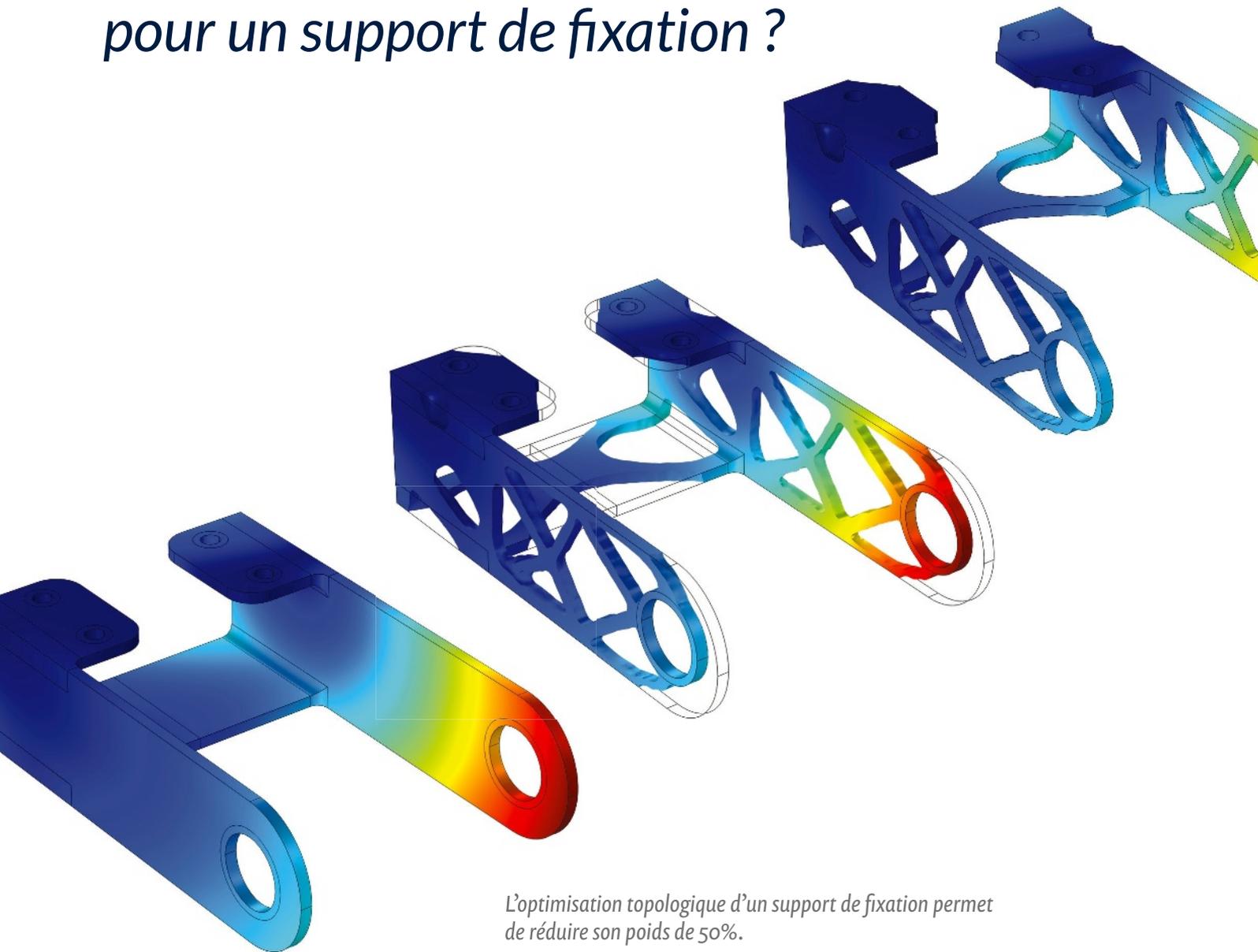


3<sup>ème</sup> épisode

avec le Dr **Alexis Génin**  
interviewé par Sébastien Bohler

Docteur en  
neurosciences

# Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



*L'optimisation topologique d'un support de fixation permet de réduire son poids de 50%.*

Cela dépend des objectifs de conception. Les méthodes d'optimisation topologique permettent de trouver la meilleure version possible d'une structure pour un usage spécifique. Un support peut être optimisé pour un seul type de chargement, tandis qu'un autre est optimisé pour huit. La fonctionnalité Density Model simplifie le processus d'optimisation topologique pour les ingénieurs en calcul de structure.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour l'optimisation topologique.

[comsol.blog/density-topology](https://comsol.blog/density-topology)