POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

L 13256 - 519 - F: 6,90 € - RD

JANVIER 2021
N° 519

ÉVOLUTION
COUCOUS ET NIDS PARASITÉS : RUSES ET CONTRE-RUSES

GÉOSCIENCES
PRÉDIRE L'EFFONDREMENT DES VOLCANS

SCIENCE ET SOCIÉTÉ
L'IA PEUT-ELLE DÉTECTER LES MENSONGES ?

LA GRANDE TACHE ROUGE DE JUPITER

Pourquoi cette tempête géante persiste depuis 350 ans

CANNABIS
L'ANTIDOULEUR DU FUTUR ?

BEL/LUX : 7,9 € - CH : 12,70 CHF – CAN : 12,50 $CA

Institut du Cerveau ICM

BRAINCAST

La voix des neurones

Le podcast de *Cerveau & Psycho*

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

5ème épisode

Huntington et maladies neurologiques héréditaires : quels espoirs de thérapie ?

www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/

5ème épisode

avec le Pr Alexandra Durr

interviewée par Sébastien Bohler

Neurologue et chercheur en neurosciences

Cerveau & Psycho

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Théo Torcq

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager: Aëla Kervhuel

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Laureline Berthelot, Étienne Berthier, Maud Bruguière, Sylvie Charbit, Ashwin Chinnayya, Emmanuel Farge, Davide Franco, Sophie Gallé-Soas, Mélanie Guigueno, Jean-Jacques Hublin, Sophie Lumineau, Caroline Vanhoove

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
www.boutique.groupepourlascience.fr
Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Adresse postale:
Service abonnement
Groupe Pour la Science
56 rue du Rocher
75008 Paris

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

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Alicia Abadie
Tél. 04 88 15 12 47
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmut
President: Dean Sanderson
Executive vice president: Michael Florek

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

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

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC
10-31-1282
pefc-france.org

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

DES EXPÉRIENCES ET DES MODÉLISATIONS, PAR JUPITER !

Les sondes spatiales et les télescopes, en particulier le télescope spatial *Hubble*, nous ont fourni de magnifiques vues de Jupiter, cette planète géante et gazeuse distante de plusieurs centaines de millions de kilomètres. Sur ces images, on remarque tout de suite, enserrée par des bandes atmosphériques turbulentes et diversement colorées, la Grande Tache rouge. Il s'agit d'une tempête anticyclonique, dont la taille avoisine 15 000 kilomètres, soit un peu plus que le diamètre de la Terre… Un tourbillon gigantesque qui est là depuis au moins 350 ans, comme l'attestent les premières observations effectuées à l'aide de lunettes astronomiques.

Comment une tempête aussi spectaculaire peut-elle naître et persister si longtemps dans l'atmosphère agitée de Jupiter? S'étend-elle dans les profondeurs de la planète ou se limite-t-elle à sa surface? Par quels mécanismes évolue-t-elle? Telles sont les énigmes posées par la Grande Tache rouge aux physiciens et aux planétologues. Daphné Lemasquerier, Benjamin Favier et Michael Le Bars soulèvent dans ce numéro un coin du voile (*voir pages 24 à 33*). Leurs expériences de laboratoire à échelle réduite, des modélisations et des simulations numériques indiquent que la Grande Tache rouge serait un «tourbillon flottant», une structure relativement plate qui s'est formée et s'entretient grâce à la rotation de la planète et à la stratification de son atmosphère.

Le spectacle offert par l'atmosphère turbulente de Jupiter est sans conteste d'une grande beauté. Au cours des récentes années, plusieurs scientifiques ont tenté de déterminer ce qui fait la «beauté» d'un paysage ou d'un dessin, et leurs travaux suggèrent que la complexité est un élément clé. Complexe, Jupiter l'est assurément, au moins sur le plan visuel. La Grande Tache rouge l'est aussi à un niveau plus abstrait, par les mécanismes qui l'engendrent et la maintiennent. Mais la beauté des tourbillons flottants tient également à quelque chose qui semble antinomique de la complexité: l'universalité de ces structures, dont on a trouvé des exemples ailleurs que sur Jupiter, dans nos océans notamment. ■

SOMMAIRE

N° 519 /
Janvier 2021

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Comment le Covid-19 entraîne la perte de l'odorat
- Un diamant colloïdal pour manipuler la lumière
- L'étonnant tourbillon de feu bleu
- Le luxe des aristocrates d'Augustodunum
- Comment les cellules s'organisent en organes
- GrANoLA, l'île disparue
- Du magma pour faire glisser les plaques tectoniques
- A-t-on observé la naissance d'un magnétar?
- Le cycle CNO du Soleil mis en évidence
- Sclérose en plaques: une défense venue de l'intestin

P. 18
LES LIVRES DU MOIS

P. 20
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Le bit, une unité superflue?
Gilles Dowek

P. 22
QUESTIONS DE CONFIANCE
Teinture capillaire et crédibilité politique
Virginie Tournay

En couverture :
© Nasa, ESA, A. Simon (Centre de vol spatial Goddard), M. H. Wong (université de Californie, Berkeley) et l'équipe OPAL

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.

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

GRANDS FORMATS

P. 34
ÉTHOLOGIE
CONTRER LES MAUVAIS COUPS DU COUCOU
Francisco Ruiz-Raya et Manuel Soler

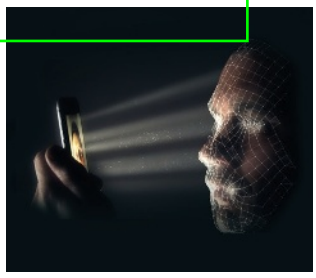
La coévolution entre des oiseaux parasites, tels que les coucous, et leurs hôtes a produit d'étonnantes adaptations. Une course aux armements qui touche toutes les étapes du cycle de reproduction des oiseaux.

P. 54
GÉOSCIENCES
PRÉDIRE L'EFFONDREMENT DES CRATÈRES VOLCANIQUES
Fabrice R. Fontaine

Au cours des grandes éruptions, des ondes sismiques de très basses fréquences indiquent l'imminence de la formation d'une grande dépression – une caldeira – assez tôt pour prévenir les populations.

P. 42
MÉDECINE
CANNABIS : L'ANTIDOULEUR DU FUTUR ?
Bernard Calvino

Depuis octobre 2020, un décret français autorise enfin l'utilisation du cannabis à des fins thérapeutiques. Reste à bien comprendre comment il exerce son action antalgique et anti-inflammatoire pour l'utiliser de la façon la plus efficace, notamment en combinaison avec la morphine.



P. 64
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
DÉTECTER AUTOMATIQUEMENT LES MENTEURS ?
Hugues Delmas

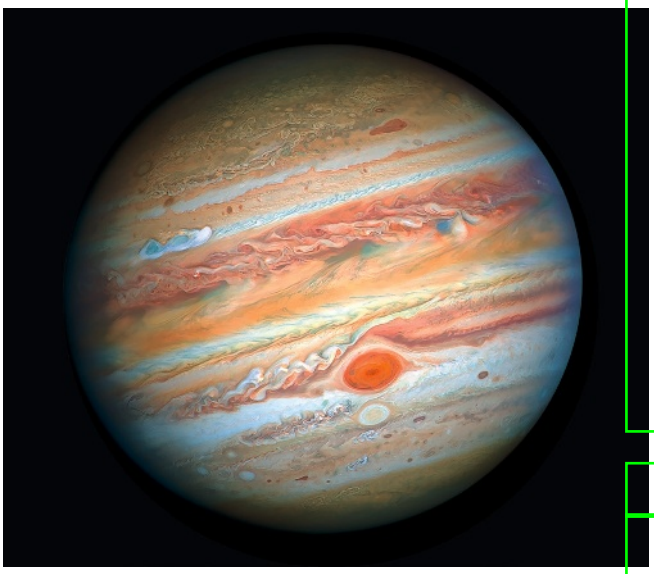
Des logiciels d'analyse faciale prétendent déterminer si vous mentez ou dites la vérité lors d'un contrôle à l'aéroport, par exemple. Le problème, c'est qu'ils ne sont pas fiables.

P. 70
HISTOIRE DES SCIENCES

LES PIONNIÈRES DE L'ARCHÉOLOGIE AMAZONIENNE
Stéphen Rostain

Au xx^e siècle, deux femmes de caractère, Betty Meggers et Anna Roosevelt, prouvèrent que l'Amazonie précolombienne était un terrain archéologique tout aussi riche que la Mésoamérique.

À LA UNE



P. 24
PHYSIQUE

LA GRANDE TACHE ROUGE DE JUPITER... EN LABORATOIRE !
Daphné Lemasquerier, Benjamin Favier et Michael Le Bars

De récentes expériences et simulations numériques indiquent que l'immense tempête qui persiste sur la planète géante depuis plusieurs siècles serait un « tourbillon flottant ». Un type de formation que l'on a aussi découvert dans les profondeurs des océans terrestres.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL

CHANGER DE NUMÉRATION AVEC LE SYSTÈME « ESPERLUETTE »
Jean-Paul Delahaye

Comment convertir facilement l'écriture décimale d'un entier en son écriture dans une autre base de numération ? Certaines procédures permettent de le faire... sans avoir à calculer !

P. 86
ART & SCIENCE

Une vie entre mica et calcite
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE

Quand la neige se métamorphose
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Comment les théropodes perdent leurs doigts
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE

Variations sur mousses en bulle majeure
Hervé This

P. 98
À PICORER

COMMUNIQUÉ
PAGES I À IV (APRÈS LA P. 49)

Optimiser la conduite du réseau électrique grâce à l'intelligence artificielle
En partenariat avec
ENEDIS
L'ÉLECTRICITÉ EN RÉSEAU

ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.18 *Livres du mois*
P.20 *Homo sapiens informaticus*
P.22 *Questions de confiance*

MÉDECINE

COMMENT LE COVID-19 ENTRAÎNE LA PERTE DE L'ODORAT

La perte d'odorat est un symptôme si fréquent chez les personnes atteintes du Covid-19 que certains chercheurs l'ont recommandée comme test diagnostic.

Les mécanismes moléculaires à l'origine de ce symptôme sans gravité mais parfois pénible commencent à se dévoiler.

On estime qu'environ 80 % des personnes atteintes du Covid-19 souffrent de troubles de l'odorat, et nombre d'entre elles souffrent également de dysgueusie ou d'agueusie (respectivement une perturbation ou une perte du goût) ou de modifications de la capacité à détecter des substances irritantes comme le piment. La perte d'odorat est si fréquente chez les personnes infectées par le coronavirus que certains chercheurs ont recommandé qu'elle soit utilisée comme test diagnostic, car elle pourrait être un marqueur plus fiable que la fièvre ou d'autres symptômes.

Mais un mystère persiste: comment le SARS-CoV-2 (le virus responsable du Covid-19) prive-t-il ses victimes de leur olfaction et de leur goût? Au tout début de la pandémie, les médecins craignaient que l'anosmie ne signale que le virus se frayait un chemin vers le cerveau, où il aurait pu causer des dommages sérieux et durables, *via* les neurones olfactifs présents dans le nez. Mais des études ont montré que ce n'est probablement pas le cas, explique Sandeep Datta, neuroscientifique à la faculté de médecine de l'université Harvard. «Une lecture d'ensemble des données disponibles à ce jour suggère que les dommages principaux sont en fait localisés dans le nez, dans l'épithélium nasal», la couche de cellules chargée d'enregistrer les odeurs. «Il semble que le virus attaque principalement les cellules de soutien et les cellules souches et non pas les neurones directement», détaille Sandeep Datta. Mais cela ne signifie pas que les neurones ne peuvent pas être affectés, précise-t-il.

Les neurones olfactifs ne possèdent pas à leur surface de récepteurs ACE2 (pour «enzyme de conversion de l'angiotensine 2»), qui permettent au SARS-CoV-2 de pénétrer dans les cellules. Mais les cellules dites «sustentaculaires», qui soutiennent et protègent les neurones olfactifs, sont constellées de récepteurs ACE2. Ces cellules maintiennent, dans le mucus qui tapisse l'épithélium olfactif, le délicat équilibre ionique nécessaire aux neurones olfactifs pour engendrer des signaux à destination du cerveau. Si cet équilibre est perturbé, cela peut entraîner un arrêt de la signalisation neuronale – et donc de l'odorat. Les cellules sustentaculaires fournissent également un soutien métabolique et mécanique aux cils situés à l'extrémité des neurones olfactifs, sur lesquels sont concentrés les récepteurs qui détectent les odeurs. «Si quelque chose perturbe physiquement ces cils, cela influe sur la capacité à sentir», explique Sandeep Datta.

Dans une étude publiée début juillet 2020, Nicolas Meunier, de l'université Paris-Saclay, a infecté le nez de hamsters avec le SARS-CoV-2. Deux jours plus tard, environ la moitié des

cellules sustentaculaires des rongeurs étaient infectées. Mais les neurones olfactifs restaient épargnés, même après deux semaines. Et, de façon étonnante, l'épithélium olfactif des hamsters était complètement détaché, un peu comme de la peau qui pèle après un coup de soleil, selon Nicolas Meunier. Bien que les neurones olfactifs n'aient pas été infectés, leurs cils avaient complètement disparu. « Or si vous enlevez les cils, vous supprimez les récepteurs olfactifs et donc la capacité de détecter les odeurs », explique Nicolas Meunier.

La dégradation de l'épithélium olfactif pourrait expliquer la perte de l'odorat. Mais on ignore encore si les dommages sont causés par le virus lui-même ou par une invasion de cellules immunitaires, ce que Nicolas Meunier a observé après l'infection. Une chose est sûre : on ne rapporte pas autant de cas d'anosmie dans d'autres maladies virales. « Nous pensons que c'est un symptôme très spécifique au SARS-CoV-2 », déclare Nicolas Meunier. Lors de travaux antérieurs sur d'autres virus respiratoires menés dans son laboratoire, il a constaté que les cellules sustentaculaires n'étaient que rarement infectées, alors que dans le cas du SARS-CoV-2, environ la moitié de ces cellules contenaient l'agent pathogène. Dans d'autres infections virales, l'odorat est souvent perturbé par une obstruction du nez, mais le Covid-19 ne provoque généralement pas de congestion nasale.

D'autres indices sur la façon dont le coronavirus fait disparaître les odeurs proviennent de personnes qui se remettent d'une anosmie. « La majorité des patients perdent l'odeur soudainement et la récupèrent vite, mais quelques-uns ont une anosmie beaucoup plus persistante et retrouvent l'odorat sur des échelles de temps bien plus longues », explique Sandeep Datta. L'épithélium olfactif se régénère régulièrement, « une protection contre l'agression constante des toxines présentes dans l'environnement », précise Nicolas Meunier.

> **Le virus n'attaque pas les neurones directement**

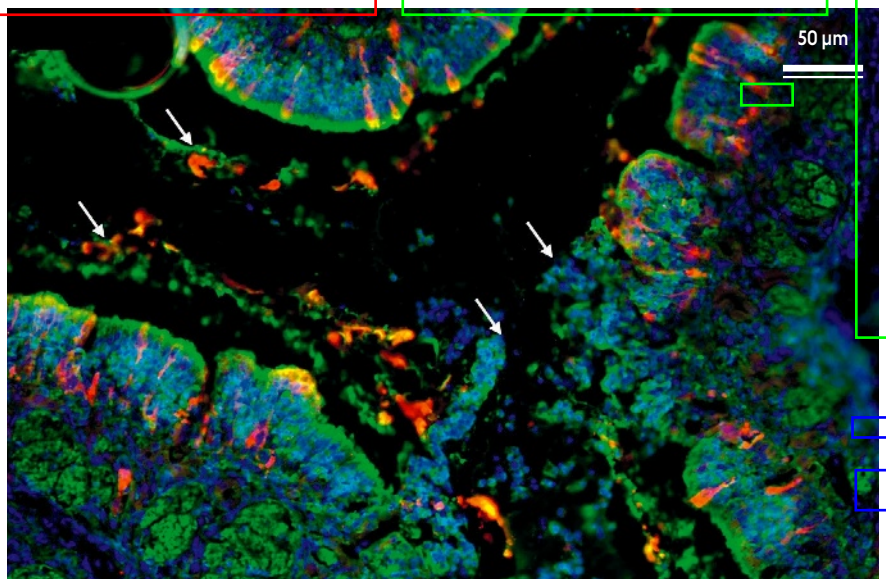
Selon Carol Yan, rhinologue à l'université de Californie à San Diego, l'anosmie constitue un risque réel pour la santé : « Elle augmente la mortalité. Si vous ne pouvez pas sentir et goûter la nourriture, cela vous expose à des dangers, comme des intoxications. L'anosmie peut aussi entraîner un handicap social ou des carences nutritionnelles. »

Cette variation sur le thème sensoriel s'étend à un autre symptôme appelé « parosmie » – une perception olfactive erronée –, un signe de rétablissement potentiel chez les personnes souffrant d'anosmie prolongée. La parosmie peut se produire lorsque des cellules souches qui se développent en nouveaux neurones olfactifs tentent de projeter leurs longues fibres, les « axones », à travers de minuscules trous à la base du crâne et se connectent ainsi à une structure du cerveau nommée « bulbe olfactif ». Parfois, les axones se connectent au mauvais endroit, ce qui provoque une odeur erronée, mais avec du temps, le mauvais câblage est potentiellement capable de se corriger.

Cette nouvelle est la bienvenue pour les patients concernés. Mais combien de temps durera leur anosmie ? « Nous ne pouvons pas prédire la durée de convalescence exacte », répond Carol Yan, mais elle est généralement de six mois à un an. « Dans la perte d'odorat persistante due à la grippe, après six mois, il y a 30 à 50 % de chance de guérison spontanée, ajoute-t-elle. Il y a eu des cas de guérison après deux ans. Mais nous pensons qu'au-delà, la capacité de régénération peut être entravée. Et les chances de guérison sont malheureusement assez minces. »

Il existe un dernier aspect inquiétant de l'anosmie : elle a été identifiée comme un facteur de risque pour certaines maladies neurodégénératives. « Après la pandémie de grippe dite "espagnole" de 1919, on a constaté une augmentation de la prévalence de la maladie de Parkinson, explique Nicolas Meunier. Ce serait vraiment inquiétant si quelque chose de similaire se produisait avec le Covid-19. »

Mais pour Carol Yan, cette peur est exagérée : « Il y a certainement un lien entre l'anosmie classique et les maladies neurodégénératives, mais nous pensons que l'anosmie due à une infection virale fonctionne par un mécanisme différent. Ces anosmies virales n'augmentent probablement pas le risque de maladies neurodégénératives. » Cela devrait rassurer les millions de personnes dans le monde touchées par la perte d'odorat liée au Covid-19. ■



Le virus SARS-CoV-2 *(en rouge)* attaque certaines cellules de l'épithélium olfactif, qui vont parfois jusqu'à se décoller et s'agréger dans le lumen nasal *(flèches)*.

STEPHANI SUTHERLAND

B. Bryche *et al.*, *Brain, Behavior, and Immunity*, vol. 89, pp. 579-586, 2020

Retrouvez la version longue de cet article ainsi que tous nos articles sur le Covid-19 en accès libre
www.pourlascience.fr

© Reproduit d'après *Brain, Behavior, and Immunity*, vol. 89, B. Bryche *et al.*, pp. 579-586, © 2020, avec la permission d'Elsevier

CHIMIE

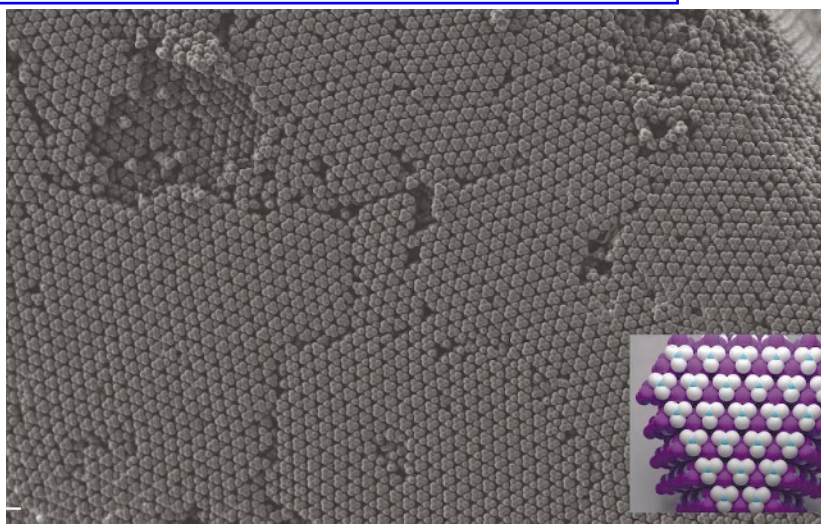
UN DIAMANT COLLOÏDAL POUR MANIPULER LA LUMIÈRE

Des colloïdes composés de microbilles et imitant la structure atomique du diamant ouvrent la voie à des interrupteurs photoniques performants et peu chers.

L'ordinateur optique fait rêver depuis de nombreuses années. En remplaçant les électrons par la lumière comme porteur de l'information, il serait en principe possible de traiter plus rapidement un volume de données plus important. Cependant, l'ordinateur optique est confronté à de nombreux obstacles. L'un d'eux, et pas le moindre, est la conception de composants adaptés, tels des transistors optiques, faciles à fabriquer et peu coûteux. Grâce à sa conception d'un système colloïdal reproduisant la structure du diamant, une équipe internationale menée par David Pine, de l'université de New York, a peut-être ouvert une piste prometteuse.

Dans les ordinateurs classiques, les transistors à semi-conducteurs servent d'interrupteurs pour contrôler la circulation des électrons. Ils sont bon marché et leur industrialisation est parfaitement maîtrisée. Leur fonctionnement est simple : un champ électrique suffit pour contrôler l'état du transistor en faisant basculer le comportement du matériau de conducteur à isolant, ou inversement. En 1987, le physicien américain Eli Yablonovitch a montré qu'il était possible de reproduire ce principe dans des systèmes photoniques. Des « cristaux photoniques » unidimensionnels ou bidimensionnels ont ainsi été construits et servent dans diverses applications. Cependant, pour des ordinateurs optiques, il faudrait des cristaux tridimensionnels présentant spécifiquement la structure du diamant. De petits exemples ont été réalisés, mais aucune approche n'a permis une industrialisation à grande échelle et bon marché.

Dans la nature, l'opale est un exemple de cristal photonique tridimensionnel. Ce minéral est constitué de microbilles de silice réparties selon un arrangement quasi régulier. À partir des années 1990, les chercheurs ont étudié la possibilité d'utiliser des colloïdes (des suspensions de microbilles cent fois plus petites que le diamètre d'un cheveu) pour fabriquer des cristaux photoniques ayant la structure du diamant. David Pine et ses collègues viennent de développer une méthode nouvelle et efficace. Ils sont partis d'une structure simple de quatre billes en polystyrène



Le diamant colloïdal est formé par autoassemblage d'éléments pyramidaux constitués de quatre microbilles de polystyrène. En gris, une vue par microscopie électronique à balayage du « diamant » réalisé. Le médaillon en couleurs est une représentation par ordinateur de la structure.

100 000 particules CONSTITUENT LES CRISTAUX PHOTONIQUES ASSEMBLÉS PAR L'ÉQUIPE DE DAVID PINE. CELA REPRÉSENTE MOINS DE 1 MICROGRAMME.

collées entre elles par du TPM (une huile polymérisable) pour former une pyramide triangulaire. Le centre de chaque face de la pyramide est rendu collant par l'immobilisation de brins d'ADN. Les pyramides s'autoassemblent dans la suspension, guidées par les interactions de ces surfaces collantes, et forment spontanément la structure recherchée.

Les chercheurs doivent encore vérifier les caractéristiques de ce nouveau matériau. « Compte tenu de la taille caractéristique de sa maille cristalline, ce matériau devrait opérer dans l'infrarouge », explique Étienne Ducrot, du centre de recherche Paul Pascal (CNRS-université de Bordeaux), qui a participé à l'étude. « Il pourrait donc être utile pour des applications dans le domaine des télécommunications. » Pour opérer dans le visible, il faudrait réduire la dimension des microbilles de moitié, ce qui pose de nouveaux défis. Mais la perspective de transistors photoniques pour des ordinateurs optiques performants semble se rapprocher. ■

SEAN BAILLY

M. He *et al.*, *Nature*, vol. 585, pp. 524-529, 2020

© POUR LA SCIENCE - Reproduction interdite sans autorisation de Springer Nature, Mingxin He *et al.*, Colloidal diamond, *Nature*, vol. 585, pp. 524-529, 2020

ÉTHOLOGIE

ENVOL PRÉCOCE D'OISILLONS

Chez certaines espèces d'oiseaux chanteurs (oscines), les oisillons quittent le nid « trop tôt ». Leurs chances de survie sont plus faibles à l'extérieur qu'à l'intérieur du nid de 14 %, d'après Todd Jones, de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis, et ses collègues. En revanche, la probabilité qu'au moins un des descendants survive et devienne indépendant est plus élevée, de 14 % aussi. La raison : quand les oisillons sont dans le nid, il y a plus de risques que toute la nichée soit perdue en cas de prédation. Quand ils sont hors du nid, les oisillons sont séparés, et le risque qu'ils disparaissent tous à cause d'un prédateur est moindre. Reste à savoir comment les parents incitent les petits à partir. ■

NICOLAS BUTOR

T. M. Jones *et al.*, *PNAS*, en ligne le 16 novembre 2020

PALÉOGÉNÉTIQUE

DE L'ADN DÉNISOVIEN HORS DE DENISOVA

L'équipe de Dongju Zhang, de l'université de Lanzhou, en Chine, a découvert de l'ADN mitochondrial dénisovien dans les sédiments de la grotte d'altitude de Baishiya, à l'extrémité nord-est du plateau tibétain. C'est la première fois que l'on en trouve hors de la grotte de Denisova, en Sibérie. Pour traquer cet ADN, les chercheurs ont exploité la méthode démontrée en 2017 par Viviane Slon, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste à Leipzig, pour identifier chimiquement l'espèce à associer aux fragments d'ADN conservés dans les sédiments des grottes. Une fois les brins d'ADN identifiés et remis dans leurs contextes stratigraphiques, il en ressort que des Dénisoviens ont occupé la grotte il y a entre 160 000 et 45 000 ans. Ainsi, il est désormais certain que des Dénisoviens étaient adaptés au plateau tibétain, vaste contrée de hautes altitudes comprises entre 1 500 et 5 000 mètres. ■

FRANÇOIS SAVATIER

D. Zhang *et al.*, *Science*, vol. 370, pp. 584-587, 2020

PHYSICOCHIMIE

L'ÉTONNANT TOURBILLON DE FEU BLEU

Photographie d'une flamme bleue (et de son reflet), dont on distingue au moins deux composantes.

En 2016, lors d'une expérience sur des tourbillons de feu, Elaine Oran et son équipe, de l'université A&M du Texas, ont observé pour la première fois un tourbillon annulaire de feu bleu. Aspect intéressant, sa couleur indiquait que la combustion était complète sans formation de suie, mais l'anneau ne semblait être qu'une partie de la flamme et les spécialistes se sont vite interrogés sur ses propriétés. Grâce à des simulations numériques, la même équipe vient d'en déterminer la structure.

De façon générale, on observe deux types de flammes très différents selon la manière dont les réactifs (l'oxygène et le combustible) sont mélangés avant que les réactions chimiques ne soient déclenchées. Si le mélange est parfaitement homogène avant l'allumage, on obtient une flamme dite de « prémélange », qui sépare les gaz frais des gaz brûlés. Elle peut être riche en combustible ou pauvre. À l'inverse, si l'oxygène et le combustible sont initialement séparés, il ne peut y avoir de réactions chimiques qu'à l'interface des deux milieux, là où les molécules vont se rencontrer par diffusion et produire une flamme dite de « diffusion ».

À partir des données expérimentales compilées par différentes équipes, Elaine Oran et son équipe ont simulé la formation du tourbillon bleu pour en comprendre la structure et la dynamique. Ils ont montré que la structure comprend en fait trois flammes différentes qui se conjuguent pour former l'anneau bleu. La partie conique inférieure est une flamme de prémélange riche, alors que la couronne pourpre supérieure est une flamme de diffusion. Le reste de combustible s'échappe alors sur les côtés et alimente une flamme de prémélange pauvre et peu visible dans les expériences. À l'endroit où les trois flammes se rejoignent, elles forment un anneau bleu et intense. ■

S. B.

J. D. Chung *et al.*, *Science Advances*, vol. 6, article eaba0827, 2020

© Sriram Bharath Hariharan

EN IMAGES

LE LUXE DES ARISTOCRATES D'AUGUSTODUNUM

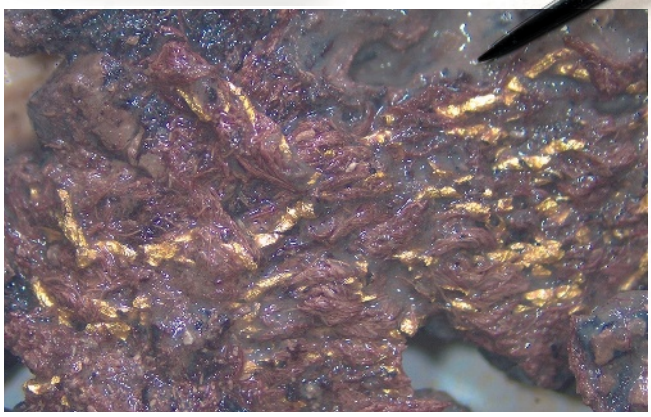
Nous savons, par les textes, qu'un lien fort reliait les Romains et le peuple gaulois des Éduens. Une équipe de l'Inrap dirigée par Carole Fossurier a retrouvé, dans une nécropole du Bas-Empire du quartier de Saint-Pierre-l'Estrier, à Autun – l'antique Augustodunum –, des objets qui en attestent (*photographies ci-contre*) : ces derniers suggèrent qu'à la fin de l'Antiquité, les aristocrates éduens avaient atteint un très haut rang social.

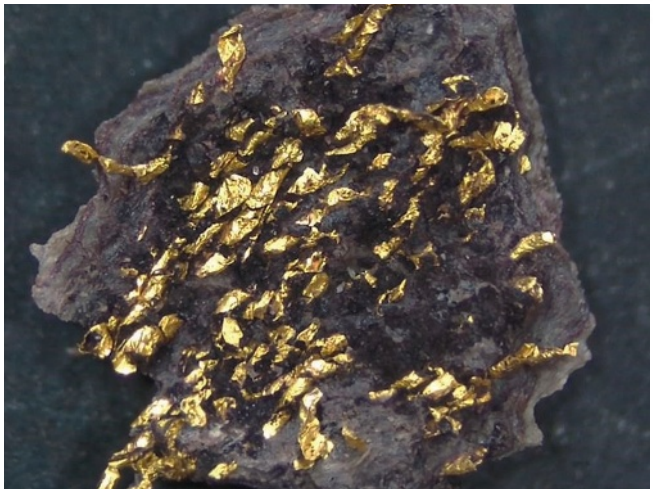
Il en est ainsi de ces exceptionnelles épingles en ambre ou en jais trouvées dans les sépultures 43 et 162, de ces boucles d'oreilles en or retrouvées dans la tombe d'un enfant, ou encore de cette bague en or sertie d'un grenat mise au jour dans celle d'un adolescent…

Toutefois, ce sont surtout deux autres types de trouvailles qui témoignent du rang extraordinaire des défunts. D'une part, six tombes contiennent des fils ou des tissus d'or et trois, voire quatre, tombes présentent des traces rouge-violet, suggérant des tissus mêlés d'or ou teintés de pourpre, un colorant extrêmement cher qui n'était utilisé que dans l'entourage de l'empereur. D'autre part, trouvaille encore plus spectaculaire, un vase diatrète en morceaux, mais complet, se trouvait dans l'un des sarcophages. Typiques du IVe siècle, ces vases à hauts-reliefs sculptés dans un bloc de verre, constitués par une coupe intérieure entourée d'une cage extérieure décorative, sont considérés comme l'aboutissement de l'art romain du verre. Pas plus d'une dizaine d'exemplaires complets sont connus pour tout l'Empire romain. C'est dire à quel point la découverte de l'un d'eux à Augustodunum montre que son propriétaire était éminent. ■

F. S.

Inrap, communiqué du 13 novembre 2020, https://bit.ly/39AdVrR





TISSUS D'OR ET DE POURPRE

Ces restes de tissages de fils d'or et les traces de pourpre qu'ils présentent (un colorant pratiquement réservé au cercle impérial) attestent de la qualité exceptionnelle des tissus dans lesquels certains des défunts ont été couchés dans leurs tombes.

© Fabienne Médard/Inrap, tous droits réservés

ÉPINGLES EN JAIS ET EN AMBRE

Ces épingles de formes très proches, présumées du IVe siècle, proviennent des sépultures numérotées 162 (épingles noires en jais) et 43 (épingles orange en ambre).

VASE DIATRÈTE

On lit sur cette partie du vase diatrète l'inscription *Vivas feliciter* (« Vis en félicité »). Pas plus d'une dizaine d'exemplaires complets de ce type de vase sont connus pour tout le monde antique.

BAGUE ET BOUCLES D'OREILLES

La bague en or sertie d'un grenat *(ci-contre)* provient de la sépulture d'un enfant ou d'un adolescent. Les boucles d'oreilles en or *(ci-dessus)* ont été découvertes dans la tombe en cercueil de plomb d'un jeune enfant.

© Denis Gliksman/Inrap (bijoux) ; © Christophe Fouquin/Inrap (vase)

BIOLOGIE CELLULAIRE

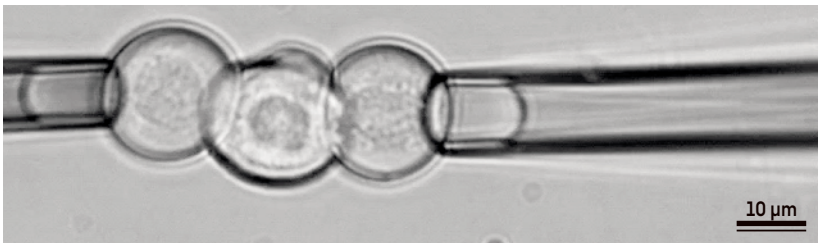
COMMENT LES CELLULES S'ORGANISENT EN ORGANES

Au cours du développement embryonnaire, un code d'adhésion associe les cellules similaires entre elles, ce qui permet la formation de tissus et d'organes.

À l'aube de leur existence, tous les organismes animaux partent d'une cellule œuf qui se divise. Durant le développement embryonnaire, plusieurs types cellulaires se différencient et s'organisent spatialement en tissus distincts, puis en organes. Mais comment les cellules se maintiennent-elles en structures organisées en dépit des réarrangements à plus grande échelle qui se produisent dans l'embryon et des perturbations qu'ils occasionnent ? Pour répondre à cette question, Sean Megason, à l'institut Blavatnik de la faculté de médecine de Harvard, et ses collègues ont étudié le processus de formation de la colonne vertébrale chez le poisson-zèbre. Ils ont découvert que chaque type cellulaire exprime une combinaison unique de molécules d'adhésion, qui détermine la nature et la force de la connexion entre les cellules et permet l'apparition de motifs tissulaires.

Pour parvenir à cette conclusion, les biologistes se sont d'abord intéressés aux morphogènes, des molécules de signalisation émises dans l'embryon en des points précis. Le taux de morphogènes auquel une cellule est exposée détermine quels programmes cellulaires sont activés et, par extension, quel sera le destin de la cellule (cellule de tissu musculaire, cellule de peau…). Mais alors que les cellules se déplacent *a priori* sans cesse dans l'embryon au fil des divisions et réarrangements globaux, comment celles qui ont subi la même influence des morphogènes et, à terme, devraient participer à la formation du même organe parviennent-elles à rester groupées ? L'hypothèse de l'adhésion différentielle, formulée en 1964 par le biologiste américain Malcolm Steinberg, pourrait bien être la clé. Selon elle, les cellules adhèrent à certains types cellulaires spécifiquement et restent ainsi ensemble.

Il fallait tester cette idée. Pour ce faire, Sean Megason et ses collègues ont associé deux cellules parmi les trois types impliqués dans la formation de la colonne vertébrale du poisson-zèbre. En appliquant une force de succion contrôlée à l'aide de micropipettes hautement précises, ils ont tiré sur les cellules dans des sens opposés. Cette expérience leur a permis de mesurer la force nécessaire pour séparer les deux cellules. Ils ont remarqué que celles de types similaires adhèrent préférentiellement entre elles, avec une force plus importante que les cellules de types différents.



Les chercheurs ont testé la force d'adhérence entre différentes cellules parmi les trois types qui constituent la colonne vertébrale du poisson-zèbre *(en haut)*. Ils ont utilisé des micropipettes dont ils contrôlaient parfaitement la succion *(ci-dessus)*.

L'analyse du profil d'expression génétique de ces types cellulaires a révélé l'implication de trois gènes (*N-cadhérine*, *cadhérine 11* et *protocadhérine 19*) dans ce processus. Les différentes combinaisons d'expression de ces gènes engendrent des préférences d'adhésion, propres à chaque type cellulaire et grâce auxquelles sont établies les connexions entre les cellules similaires pendant le développement embryonnaire. Enfin, les biologistes se sont attelés à vérifier le rôle des morphogènes. En modifiant l'activité de ces derniers, ils ont remarqué une perturbation de l'expression des trois gènes et, par conséquent, de la différenciation cellulaire. L'action des morphogènes et de l'adhésion différentielle est donc complémentaire, de telle façon que les cellules similaires restent liées et forment ainsi les tissus des organes. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

T. Y. C. Tsai *et al.*, *Science*, vol. 379, pp. 113-116, 2020

© topimages/shutterstock.com (en haut) ; © IST Austria (en bas)

EN BREF

POISON ROUTIER POUR SAUMONS

L'eau de pluie qui ruisselle sur les routes transporte des molécules jusque dans les cours d'eau. Zhenyu Tian et ses collègues, du centre pour les eaux urbaines de Tacoma, aux États-Unis, ont montré que la molécule 6PPD-quinone, qui vient des pneus de véhicules, est toxique pour le saumon coho. Ils estiment que dans les bassins-versants les plus proches de zones urbanisées, 40 à 90 % des saumons qui remontent les cours d'eau meurent des suites de cette exposition.

Science, 3 décembre 2020

CROISSANCE RAPIDE POUR LE T-REX

En étudiant les marques de croissance dans les os de différentes espèces de grands théropodes, Thomas Cullen et ses collègues, de l'université de Caroline du Nord, ont trouvé que, contrairement à d'autres prédateurs tels que l'allosaure, *Tyrannosaurus rex* connaissait une croissance fulgurante pendant son adolescence. Cette spécificité lui aurait permis de s'imposer plus jeune en tant que prédateur, au prix d'une consommation énergétique énorme lors de la phase de croissance.

Proc. R. Soc. B, 25 novembre 2020

UNE CONSTANTE ENCORE PLUS PRÉCISE

La « constante de structure fine », qui caractérise l'intensité de l'interaction électromagnétique, est un paramètre libre du modèle standard de la physique des particules, c'est-à-dire que sa valeur ne peut être déterminée qu'expérimentalement. Saïda Guellati-Khélifa et ses collègues, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, en ont effectué la mesure la plus précise à ce jour, avec onze chiffres significatifs, en faisant interagir des photons avec des atomes de rubidium à une température proche du zéro absolu.

Nature, 3 décembre 2020

© Centre allemand pour les géosciences, à Potsdam (en bas); Shutterstock.com/littlenySTOCK (en haut)

GÉOLOGIE

GRANOLA, L'ÎLE DISPARUE

Comment expliquer les similarités remarquables entre la faune terrestre de Porto Rico et celle des Petites Antilles (le chapelet d'îles situées à l'est et au sud-est de la mer des Caraïbes), il y a entre 35 et 33 millions d'années? Des indices paléontologiques suggèrent en effet que la faune sud-américaine, notamment des paresseux et certaines espèces de grenouilles et de rongeurs, s'est disséminée dans les îles au nord du continent. Les scientifiques ont fait l'hypothèse qu'à cette époque, les deux archipels, distants aujourd'hui d'une cinquantaine de kilomètres, étaient connectés par une île nommée GrANoLA (pour Greater Antilles, Northern Lesser Antilles). La zone concernée étant aujourd'hui submergée sous un kilomètre d'eau, les données géologiques qui serviraient à vérifier cette hypothèse manquaient. Mélody Philippon et ses collègues de l'université de Montpellier ont donc mené une série de travaux afin d'expliquer l'émergence et la submersion de l'île aujourd'hui disparue.

Cette apparition puis disparition seraient la conséquence d'une réorganisation des plaques tectoniques Nord-Américaine et Caraïbe et d'une augmentation de l'activité de subduction de la première sous la seconde. La partie nord-est de la plaque Caraïbe aurait alors subi une compression temporaire qui a raccourci et épaissi sa croûte. Il se serait ensuivi une élévation d'une partie de cette région qui aurait conduit à l'émergence de l'île GrANoLA. Puis la croûte terrestre serait revenue à son état initial, et aurait subi un étirement et un amincissement, à l'origine de la resubmersion des parties émergées, d'où la disparition de GrANoLA. ■

Une côte rocheuse de Porto Rico, île des Grandes Antilles.

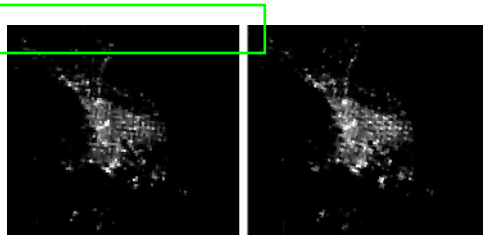
THÉO TORCQ

M. Philippon *et al.*, *Plos One*, vol. 15(10), article e0241000, 2020

ENVIRONNEMENT

DES LAMPADAIRES PAS SI COUPABLES

La pollution lumineuse nocturne est néfaste pour les animaux: elle perturbe leurs cycles circadiens et altère leur santé. Il est donc urgent de la maîtriser. Christopher Kyba et ses collègues, du Centre allemand pour les géosciences, à Potsdam, se sont appuyés sur des observations satellitaires de la ville de Tucson, en Arizona, pour quantifier la contribution de l'éclairage public à la pollution lumineuse nocturne. Cette ville est équipée d'une infrastructure *smart city*, qui permet de faire varier la luminosité des lampadaires à l'échelle de la ville. En s'appuyant sur des variations effectuées délibérément, les chercheurs ont estimé sa part dans la luminosité totale. Elle s'élève ainsi à moins de 20 % de la pollution lumineuse totale observable depuis l'espace, et est encore inférieure dans les zones les plus brillantes comme les centres-villes. Cela suggère que d'autres sources de lumière, tels les panneaux publicitaires, sont à réguler en priorité pour lutter contre ce type de nuisance. ■



Deux vues de l'espace de la ville de Tucson pour des lampadaires fonctionnant à 30 % *(à gauche)* et 100 % *(à droite)*.

T. T.

C. C. M. Kyba *et al.*, *Lighting Research & Technology*, en ligne le 28 octobre 2020

GÉOSCIENCES

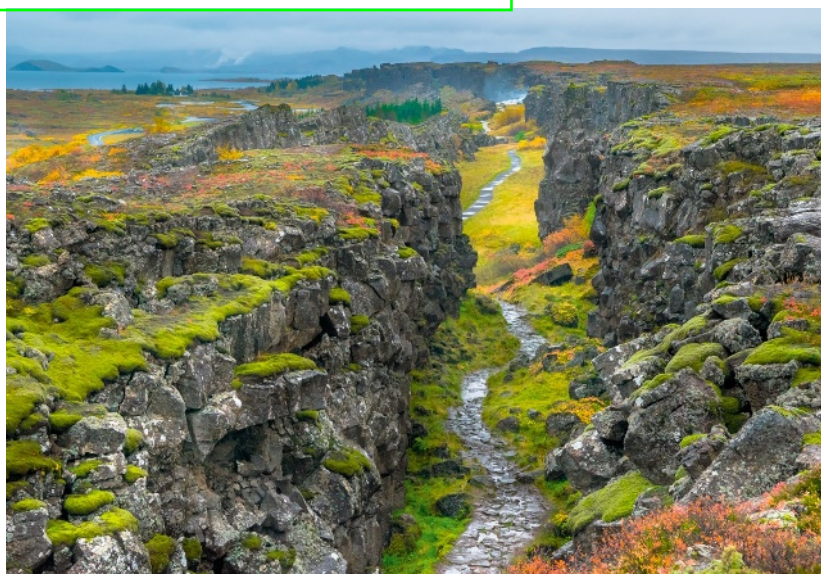
DU MAGMA POUR FAIRE GLISSER LES PLAQUES TECTONIQUES

Une petite quantité de roche fondue dans la partie supérieure du manteau réduit la viscosité qui freine le mouvement des plaques tectoniques.

Lors de la dérive des continents, comment la partie supérieure du manteau et la croûte terrestre, qui forment la lithosphère, se déplacent-elles avec une relative facilité sur la couche du manteau juste en dessous, l'asthénosphère? L'hypothèse la plus vraisemblable est que cette frontière présente une faible viscosité. Éric Debayle, géophysicien du CNRS à l'université de Lyon et à l'ENS de Lyon, et ses collègues confirment cette solution: ils ont mis en évidence qu'une petite fraction de la couche supérieure du manteau se trouve sous forme de magma (de la roche fondue), dans une proportion suffisante pour réduire la viscosité à l'interface lithosphère-asthénosphère.

Pour sonder la structure interne de la planète, les géophysiciens s'appuient principalement sur les ondes sismiques. Ils étudient les propriétés, notamment la vitesse, de ces ondes qui parcourent de grandes distances à travers le globe. C'est ainsi qu'en 1959, le sismologue allemand Beno Gutenberg a identifié la zone de moindre vitesse (*low velocity zone* ou LVZ, en anglais) qui marque la séparation entre la lithosphère et l'asthénosphère. Son interprétation a longtemps fait débat. La vitesse plus faible dans cette région pourrait s'expliquer par sa richesse en eau ou en magma, qui réduirait la viscosité. Or en 2018, l'équipe de Christopher Cline, de l'université australienne de Canberra, a montré grâce à des expériences en laboratoire que la présence d'eau influait peu sur la propagation des ondes sismiques. La piste du magma restait à confirmer et à quantifier.

La vitesse de propagation des ondes sismiques varie selon la température du milieu qu'elles traversent (plus la roche est froide, plus leur vitesse est élevée), mais aussi en fonction de la composition du milieu et s'il contient du magma. Mais il n'était pas possible de séparer ces différents facteurs avec la seule information de la vitesse. Pour résoudre ce problème, Éric Debayle et ses collègues ont développé une nouvelle technique qui consiste à prendre aussi en compte l'atténuation des ondes, qui dépend surtout de la température. En prenant en compte simultanément la vitesse et l'atténuation, les chercheurs ont distingué les différents facteurs et démontré la présence de magma dans l'asthénosphère.



Le rift islandais témoigne de l'activité tectonique de la Terre. Sous les plaques océaniques, la présence d'une petite fraction de magma facilite les mouvements de la lithosphère sur le manteau plus profond.

4 cm par an

TELLE EST LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DES PLAQUES OCÉANIQUES LES PLUS RAPIDES. OR C'EST SOUS CES DERNIÈRES QUE LA PROPORTION DE MAGMA EST LA PLUS IMPORTANTE.

L'équipe a ainsi estimé que la part de roche fondue dans l'asthénosphère sous les plaques océaniques est inférieure à 0,7% en volume. La fraction la plus importante est observée sous les dorsales et sous les points chauds (Tahiti, Hawaii, La Réunion, etc.). Une partie de ce magma remonte dans la croûte océanique, mais une partie resterait dans la LVZ, entre 100 et 200 kilomètres de profondeur. Cette fraction est suffisante pour découpler la lithosphère de l'asthénosphère.

Sous les plaques continentales, la fraction de magma serait très faible, voire nulle, probablement parce que la fusion de la lithosphère continentale, froide et plus épaisse, est plus difficile. Néanmoins, des régions assez actives, comme les rifts africains ou le Tibet, pourraient cacher une fraction de magma non négligeable. ■

S. B.

E. Debayle *et al.*, *Nature*, vol. 586, pp. 555-559, 2020

© Shutterstock.com/Nido Huebl

PRÉHISTOIRE

CHASSEURS-CUEILLEURS DU MÉSOLITHIQUE

Sur le site des Gravilliers à Pontarlier, dans le Jura, l'équipe de Jean-Baptiste Lajoux, de l'Inrap, a mis au jour des traces de campements de chasseurs-cueilleurs. Le site témoigne de leur évolution pendant tout le Mésolithique, la période allant de 10000 à 5500 avant notre ère, quand certains Européens ont continué à vivre de chasse et de cueillette tandis que d'autres, des paysans venus du Proche-Orient, introduisaient la culture et l'élevage. Ainsi, les archéologues ont pu clairement distinguer entre le premier Mésolithique (jusqu'à 7000 avant notre ère), avec ses pointes de Sauveterre et triangles scalènes débités par percussion directe, et le second Mésolithique, avec ses fines lames trapézoïdales obtenues par percussion indirecte. ■

F. S.

Inrap : https://bit.ly/2VtSWia

VIROLOGIE

ZIKA : LE RÔLE DU MOUSTIQUE

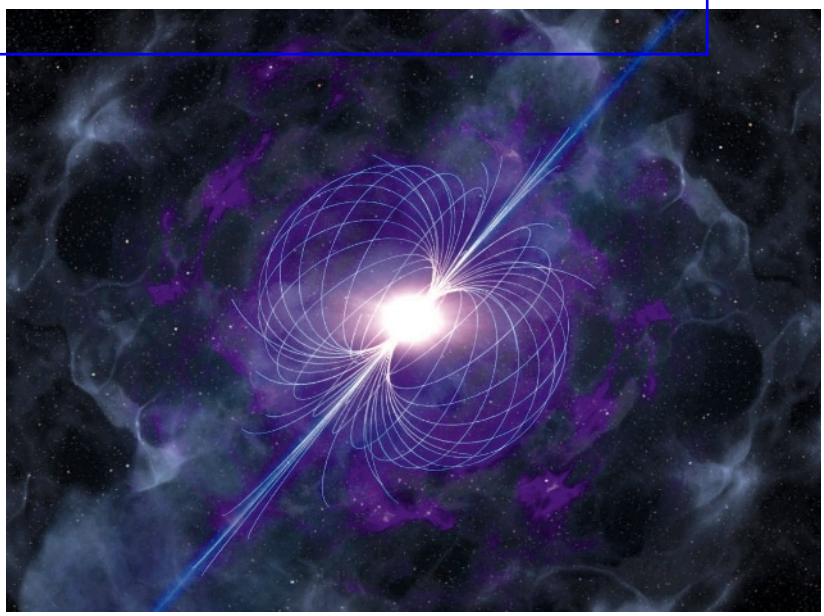
L'infection par le virus Zika a parfois des conséquences graves, comme la microcéphalie ou le syndrome de Guillain-Barré. La plus grosse épidémie a touché l'Amérique latine et les Caraïbes en 2015-2016. En revanche, l'absence de contagion d'ampleur sur le continent africain, où la présence du virus est pourtant avérée et les conditions favorables à sa propagation, interroge les scientifiques. Louis Lambrechts, virologiste à l'institut Pasteur, et ses collègues du CNRS, de l'institut Pasteur et de l'IRD, se sont penchés sur le vecteur de Zika : le moustique *Aedes aegypti*. Ils ont ainsi découvert qu'une sous-espèce de ce dernier, *A. aegypti aegypti*, vivant dans les milieux urbains d'Amérique et d'Asie, où elle se nourrit du sang des humains, était plus sensible au virus, c'est-à-dire que ce moustique se faisait infecter plus facilement par le virus et était donc plus propice à sa transmission. ■

W. R.-P.

F. Aubry *et al.*, *Science*, vol. 370, pp. 991-996, 2020

ASTROPHYSIQUE

A-T-ON OBSERVÉ LA NAISSANCE D'UN MAGNÉTAR ?



La fusion de deux étoiles à neutrons aurait formé une étoile à neutrons plus massive, un « magnétar », doté d'un champ magnétique très intense.

Le 22 mai 2020, le satellite *Neil Gehrels Swift Observatory* de la Nasa a détecté un sursaut gamma, c'est-à-dire une bouffée de rayons gamma brève et intense (avec une quantité d'énergie émise en 0,6 seconde équivalente à celle qu'émettra le Soleil durant toute sa vie). Différents instruments ont alors suivi cet événement. Les données suggèrent qu'il s'agit de la coalescence de deux étoiles à neutrons, un phénomène qui donne en général naissance à un trou noir. Cependant, le rayonnement mesuré par le télescope spatial *Hubble* dans l'infrarouge était environ dix fois plus intense que la prédiction théorique !

Wen-fai Fong, de l'université Northwestern, aux États-Unis, et ses collègues ont alors proposé deux scénarios. Le premier fait intervenir des ondes de choc dans la matière expulsée lors de la fusion des deux étoiles à neutrons. Le second prévoit que l'astre formé par la coalescence serait un magnétar, dont l'intense champ magnétique en rotation proviendrait de la transformation d'une partie de l'énergie mécanique des deux étoiles à neutrons en énergie de champ magnétique. Ce champ magnétique extrême transférerait alors une partie de son énergie aux particules chargées de la matière expulsée, augmentant la puissance de son rayonnement. D'après Wen-fai Fong et ses collègues, ce mécanisme est en mesure d'expliquer l'anomalie dans le domaine infrarouge. Les chercheurs estiment qu'entre quatre mois et trois ans après ce sursaut, les télescopes devraient observer un phénomène équivalent dans la gamme des fréquences radio. Une prédiction qui permettra de mettre à l'épreuve les deux scénarios et de savoir si l'on vient effectivement d'assister, en direct, à la naissance d'un nouveau magnétar. ■

LUCAS GIERCZAK

W. Fong *et al.*, *The Astrophysical Journal*, à paraître

© Nasa, ESA et D. Player (STScI)

ASTROPHYSIQUE

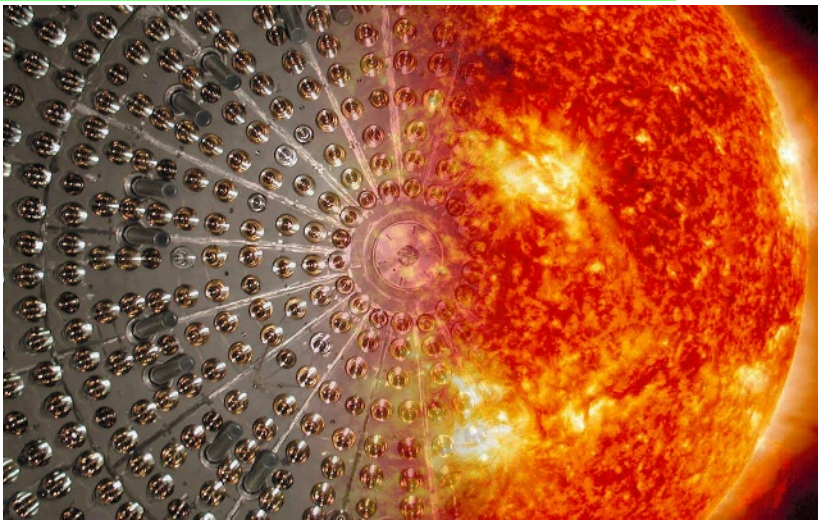
LE CYCLE CNO DU SOLEIL MIS EN ÉVIDENCE

Pour la première fois, on a identifié les neutrinos produits par le Soleil lors d'un processus de réactions nucléaires impliquant le carbone, l'azote et l'oxygène.

Depuis près de 4,5 milliards d'années, le Soleil tire son énergie de la transformation, par des réactions nucléaires, des noyaux d'hydrogène en hélium. Les différents mécanismes de cette fusion ont été esquissés dès les années 1920 et 1930. Si certains indices montraient de façon indirecte que ces processus se déroulent bien au cœur de l'étoile, la confirmation directe manquait. Une piste consistait à traquer les neutrinos, particules élémentaires produites par certaines des réactions. Grâce à l'expérience *Borexino*, installée au laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie, une équipe internationale a enfin identifié les neutrinos solaires liés à un cycle de fusion impliquant les noyaux de carbone, d'azote et d'oxygène, le «cycle CNO».

En effet, la fusion de l'hydrogène se fait de deux façons dans le Soleil: la chaîne proton-proton et le cycle CNO. La chaîne proton-proton, esquissée d'abord par le physicien français Jean Perrin, représente 99% de l'énergie produite. Le cycle CNO, plus complexe, a été proposé par les Allemands Carl Friedrich von Weizsäcker et Hans Bethe de façon indépendante en 1937 et 1939: l'hydrogène se transforme en hélium par l'intermédiaire d'un cycle de fusions et d'émissions radioactives impliquant des éléments plus lourds (carbone, azote et oxygène). Ce mécanisme est limité au sein du Soleil, où ces éléments sont rares; il est en revanche prépondérant dans des étoiles au moins 1,3 fois plus massives que le Soleil.

Les deux processus de fusion produisent des neutrinos dont le flux présente une distribution (ou spectre) en énergie caractéristique. Dès lors, en analysant l'énergie des neutrinos solaires détectés lors de leur passage sur Terre, il est possible de déterminer si la chaîne proton-proton et le cycle CNO sont bien à l'œuvre dans l'étoile. En 2018, l'expérience *Borexino* a ainsi mis en évidence la chaîne proton-proton. Cette expérience est installée à 1400 mètres sous la surface, ce qui la protège des rayons cosmiques. Elle est constituée d'une enceinte de 4,25 mètres de rayon remplie d'un liquide scintillateur qui émet de la lumière quand un neutrino interagit avec son contenu. Cette enceinte est entourée de différents blindages pour limiter le bruit de fond – des rayons cosmiques résiduels et la radioactivité naturelle ambiante.



L'expérience *Borexino (à gauche, une vue de l'intérieur du dispositif)* détecte des neutrinos émis par le Soleil *(à droite)*.

65 milliards

C'EST, PAR CENTIMÈTRE CARRÉ ET PAR SECONDE, LE FLUX DE NEUTRINOS ÉMIS PAR LE SOLEIL QUI TRAVERSENT LA TERRE. CES PARTICULES INTERAGISSENT TRÈS PEU AVEC LA MATIÈRE ET SONT DONC TRÈS DIFFICILES À DÉTECTER.

La difficulté pour mettre en évidence les neutrinos du cycle CNO solaire est qu'ils sont peu nombreux et que le flux exact dépend de l'abondance des éléments lourds dans le cœur de l'étoile, une donnée mal connue. En outre, le spectre en énergie de ces neutrinos est assez proche de celui des neutrinos émis par la radioactivité naturelle du bismuth 210.

Grâce à des données recueillies pendant plus de 1 000 jours entre 2016 et 2020, les membres de l'équipe *Borexino* ont réussi à isoler les neutrinos du cycle CNO, processus qui contribue à 1% de l'énergie du Soleil. Ils ont précisé par la même occasion l'abondance en éléments lourds de l'astre. Une abondance importante pour comprendre la dynamique solaire, car elle joue sur l'opacité du plasma, la température du cœur et la façon dont la chaleur se propage au sein de l'étoile. ■

S. B.

Collaboration *Borexino*, *Nature*, vol. 587, pp. 577-582, 2020

© Maxim Gromov et collaboration Borexino

EN BREF

FRAUDE AUX PSEUDOFLEURS

Le champignon *Fusarium xyrophilum* infecte des plantes à fleurs (du genre *Xyris*) qui poussent en Amérique du Sud. Il prend alors une forme de fleurs jaunes et émet un composé volatil qui attire des insectes pollinisateurs, lesquels disséminent ensuite les spores du parasite. Imane Laraba, de l'université Purdue, aux États-Unis, et ses collègues ont aussi montré que *F. xyrophilum* bloque la formation des vraies fleurs de la plante !

Fungal Genet. Biol., novembre 2020

LA TRISTE FIN D'ARECIBO

Suite à la rupture en août 2020 d'un premier câble de soutien de la plateforme de 900 tonnes qui porte les récepteurs du radiotélescope d'Arecibo, et d'un second en novembre, la Fondation américaine des sciences avait décidé de fermer pour de bon l'observatoire, sis à Porto Rico. Le 1er décembre, d'autres câbles ont cédé et la plateforme s'est écrasée en contrebas sur la parabole de 305 mètres de diamètre. Triste fin pour cet instrument qui était toujours actif et un site si reconnaissable dans les films *GoldenEye* (1995) et *Contact* (1997).

COMBIEN DE POISSONS EN MER ?

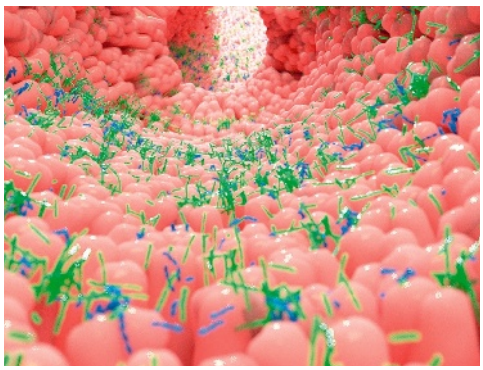
Cette question est cruciale pour préserver les écosystèmes marins. Jusqu'à présent, l'ADN que dispersaient les poissons dans l'eau permettait d'évaluer la diversité des espèces présentes. En comparant des analyses d'ADN contenu dans l'eau de mer avec la quantité de poissons capturés lors de chalutages, Mark Stoeckle, de l'université Rockefeller, à New York, et ses collègues viennent de montrer que cet ADN permet aussi d'estimer la biomasse et donc la taille des populations.

ICES J. Mar. Sci., 3 décembre 2020

© Alpha Tauri 3D Graphics / shutterstock.com (en haut); © Vadim Nefedoff/shutterstock.com (en bas)

BIOMÉDECINE

SCLÉROSE EN PLAQUES : UNE DÉFENSE VENUE DE L'INTESTIN



Chez des personnes atteintes de sclérose en plaques, des cellules immunitaires ayant été au contact de bactéries dans les muqueuses intestinales *(telles celles représentées sur cette illustration)* migrent jusqu'aux sites nerveux touchés par la maladie.

La sclérose en plaques, la plus commune des maladies auto-immunes chroniques du système nerveux central, touche plus de deux millions de personnes dans le monde. Au cours de cette maladie, le système immunitaire se retourne contre l'organisme et attaque la myéline, la gaine protectrice des neurones du cerveau et de la moelle épinière. Les lésions qui en découlent occasionnent des troubles moteurs, sensoriels et cognitifs. Depuis quelques années, des liens sont suspectés entre des anomalies du microbiote intestinal et ce dérèglement de l'immunité. Or Anne-Katrin Pröbstel, de l'université de Californie à San Francisco, et ses collègues viennent de montrer que ce même milieu intestinal serait aussi à l'origine de mécanismes de défense de l'organisme contre ce processus.

Si diverses études ont montré que la composition bactérienne du microbiote est altérée chez les personnes souffrant de sclérose en plaques, son rôle dans la maladie reste mal connu. En revanche, il semble de plus en plus clair que le microbiote intestinal influe sur les cellules immunitaires alentour dans d'autres pathologies : des lymphocytes B – une sous-population de ces cellules – apprennent à reconnaître les bactéries qu'ils rencontrent, puis sont capables d'atteindre d'autres régions de l'organisme *via* la circulation sanguine. L'équipe a montré que de tels lymphocytes B « éduqués » pour identifier des bactéries particulièrement abondantes chez des personnes atteintes de sclérose en plaques se retrouvent ensuite dans les régions nerveuses attaquées par la maladie. Elles y produisent une protéine, l'interleukine-10, qui y réduirait l'inflammation. ■

NOËLLE GUILLON

A.-K. Pröbstel *et al.*, *Science Immunology*, vol. 5, article eabc7191, 2020

CLIMATOLOGIE

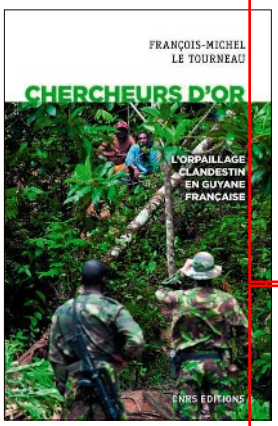
L'EFFET DE LA FONTE DES GLACES

Les surfaces dépourvues de glace sont plus sombres et réfléchissent moins le rayonnement solaire.

La disparition de la cryosphère – l'ensemble des glaces de la planète –, entraînée par le réchauffement climatique, contribue en retour à ce dernier. Plusieurs mécanismes entrent en jeu : le changement d'albédo des surfaces dégelées qui réfléchissent moins la lumière du soleil, l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère (qui agit comme un gaz à effet de serre) et la modification de la couverture nuageuse. Il était difficile de quantifier l'impact de la fonte des glaces dans la hausse des températures. Grâce à de nouvelles simulations, Nico Wunderling et ses collègues de l'université de Potsdam ont estimé que, à long terme, la contribution de ce phénomène serait de 0,43 °C pour un réchauffement total de 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Localement, l'élévation de la température serait parfois très importante : elle pourrait atteindre les 5 °C au Groenland et en Antarctique, avec comme conséquence des perturbations importantes sur les écosystèmes de ces régions. ■

T. T.

N. Wunderling *et al.*, *Nature Communications*, vol. 11, article 5177, 2020



ÉCOLOGIE

IL FAUT SAUVER NOS INSECTES !

Denis Richard
et Pierre-Olivier Maquart

OPIE-Delachaux & Niestlé, 2020
192 pages, 29,90 euros

Pourquoi faut-il « sauver le soldat insecte » ? Parce que les disparitions d'insectes indiquent l'importance de la sixième extinction que nous causons et dont nous serons l'une des victimes. La préservation réussie de ces arthropodes montrerait que nos actions pour infléchir cette extinction de masse peuvent être efficaces. Mais nous sommes encore loin du compte. Les cas emblématiques choisis par ce livre remarquable montrent la complexité des causes de raréfactions. Ce ne sont ni les seuls ni les plus graves. Les solutions préconisées visent à protéger les écosystèmes. Cependant, protéger un site n'est pas forcément efficace.

Parnassius corybas gazeli, sous-espèce endémique du parc national du Mercantour, est en danger d'extinction. Or les stations les plus remarquables de ce papillon rarissime sont détruites par le pâturage. Dans les parcs nationaux français, les activités agricoles « traditionnelles » ont pour effet des dévastations monstrueuses causées par des troupeaux géants (quelque 600 000 moutons se jettent sur les Alpes chaque été), qui font disparaître des dizaines d'espèces d'insectes endémiques. Autre cas d'école, le papillon *Graellsia isabellae* : la toute première station où il a été observé en France, à L'Argentière-la-Bessée, a brûlé récemment. A-t-elle été replantée en pins sylvestres, plante hôte de cette espèce emblématique ? Que nenni : elle a été replantée en mélèzes, sur lesquels le papillon ne peut vivre.

Seuls les entomologistes de terrain ont le savoir nécessaire à des protections efficaces des insectes et de leurs milieux de vie. Au lieu de s'appuyer sur eux, les autorités cherchent à contrôler les entomologistes qui pourraient détenir des insectes protégés. Pénaliser ceux qui pourraient être les acteurs essentiels de la conservation revient à faire le contraire de ce qui serait utile.

Ce livre, de belle facture et au texte très clair, devrait être lu par tous.

ANDRÉ NEL
MNHN, PARIS

HISTOIRE DES SCIENCES

HISTOIRE DES NOMBRES

Grégory Chambon

PUF, 2020
128 pages, 9 euros

Rejetant toute hiérarchisation entre « primitifs » et « civilisés », l'auteur essaie de comprendre le rapport qu'ont entretenu les hommes avec les nombres, tant dans le domaine intellectuel que matériel. Les nombres sont partout : dans les journaux, les publicités, les jeux vidéo, sur les fiches de paie, chez les commerçants. Habitués à eux, nous y voyons des outils naturels et efficaces pour appréhender le monde. Nous leur faisons confiance et reportons sur ceux qui les manipulent nos éventuels soupçons. Du coup, nous oublions que l'usage des nombres est difficile et que celui qu'en fait notre société, loin d'aller de soi, repose sur le rapport spécifique qu'elle entretient avec eux.

L'auteur expose ces spécificités grâce à des excursions en Mésopotamie ancienne, en Égypte pharaonique, dans l'Antiquité grecque, en Chine des Shang (XIVe-XIe siècles avant notre ère), chez les Mayas de l'époque classique, etc. Elles montrent à la fois la richesse des conceptions des nombres que ces civilisations se sont faites et la difficulté pour les historiens de déduire celles-ci à partir des vestiges qu'elles ont laissées. On estime par exemple qu'un écrit mathématique qui nous est parvenu depuis l'Antiquité grecque, de traductions arabes en traductions latines, en copies, en rééditions, etc., a une quarantaine d'auteurs !

Les mathématiques aujourd'hui tendent vers l'abstraction, ce qui les éloigne de la conception du nombre comme « quantité de… ». En tout cas, difficile à cerner, la notion de nombre reste sans définition satisfaisante. De cela, l'usager quotidien n'a cure. Il utilise les nombres pour standardiser la société par des normes numériques et pour donner des représentations simples, sinon simplistes, de réalités sociales complexes.

DIDIER NORDON
ESSAYISTE ET MATHÉMATICIEN ÉMÉRITE

ZOOLOGIE-ÉTHOLOGIE

HISTOIRE DE LA DOMESTICATION ANIMALE

Valérie Chansigaud

Delachaux & Niestlé, 2020
400 pages, 24,50 euros

L'autrice, historienne des sciences de la nature et de l'environnement, en est à son onzième ouvrage. C'est à mon avis le plus ambitieux: « Le sujet de cette *Histoire de la domestication animale* est bien le phénomène de la domestication elle-même. Je m'intéresse donc aux espèces, ou, pour être plus précise, principalement aux populations animales qui les constituent. Ce sont ces dernières qui sont soumises à la sélection artificielle. Ce livre n'est donc pas une histoire de l'élevage, ni celle des variétés domestiques, il existe des ouvrages remarquables sur ces sujets. » Chercheuse associée à l'université Paris-Diderot et au Muséum national d'histoire naturelle, elle actualise ce thème par les données de séquençage génétique. Les références et illustrations en noir et blanc sont nombreuses et bien choisies.

L'ouvrage, dense et de prix abordable, commence par le chien, de loin le plus ancien animal domestique. Puis l'autrice passe en revue non seulement les autres espèces, mais aussi le processus de domestication et ses conséquences sur les humains. Elle mentionne les impacts sanitaires de la domestication et même « l'autodomestication de l'homme », thèse avancée par Charles Darwin, Konrad Lorenz et Franz Boas.

Ce livre est animé par un désir de partager le savoir et par une défense sans sectarisme de la cause animale : « [...] La question de ma position idéologique me sera inévitablement posée. Cet ouvrage n'a pas pour but de faire triompher une cause particulière : je ne cherche pas à donner des arguments pour justifier l'interdiction de l'exploitation animale, pas plus qu'à cautionner la domination des animaux. Si j'accorde une si grande place à la souffrance animale, c'est qu'il est devenu impossible de ne pas prendre en compte celle-ci [...]. »

PIERRE JOUVENTIN
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

CHERCHEURS D'OR

François-Michel Le Tourneau

CNRS, 2020
428 pages, 26 euros

L'auteur, géographe, gâte les amazonistes avec pas moins de deux ouvrages en deux ans sur l'immense espace tropical d'Amérique du Sud. Cette fois-ci, il se penche sur une plaie qui gangrène depuis plus de deux décennies la Guyane française : l'orpaillage illégal. Telle une inexorable *marabunta* vorace, un tsunami de *garimpeiros* (orpailleurs brésiliens) s'est abattu sur la plus grande région française, ressurgissant chaque fois que leurs camps sont détruits par l'armée.

C'est justement avec les soldats que le scientifique s'est associé pour cerner cet insoluble problème. La misère a chassé de pauvres hères du Brésil dans l'espoir d'une vie meilleure dans la forêt guyanaise. S'ils ont trouvé quelques pépites, aucun n'a atteint la richesse et leur existence demeure indigne. Entre petits chefs dictatoriaux et semi-esclaves, marchands véreux et filles sans joie, évangélistes avides et profiteurs de saloons forestiers, ce *far west* clandestin révèle une vie ignominieuse. À l'opposé, les forces de l'ordre affrontent un casse-tête insoluble au milieu du labyrinthe végétal du ventre de la Guyane. À peine tranchées, les têtes de l'hydre de l'or repoussent plus nombreuses encore à quelques kilomètres de distance.

Souvent en première page de la presse locale guyanaise, la tragédie de l'or reste largement ignorée en métropole. C'est tout à l'honneur de François-Michel Le Tourneau de proposer une passionnante étude sur ce sujet, qui plonge le lecteur dans les affres des mines. Son grand mérite est d'éviter la condamnation unilatérale tout en essayant de comprendre les enjeux économiques, sociaux, écologiques, légaux et politiques de chaque acteur de ce drame guyanais occulté.

STÉPHEN ROSTAIN
ARCHÉOLOGIE DES AMÉRIQUES (CNRS-UNIVERSITÉ PARIS 1)

ET AUSSI

ET L'ÉVOLUTION CRÉA LA FEMME
Pascal Picq

Odile Jacob, 2020
464 pages, 22,90 euros

Dans cet essai, l'auteur, paléoanthropologue, tente d'expliquer les origines anciennes de la coercition exercée par les hommes sur les femmes dans la plupart des sociétés connues. Chez les animaux, l'éthologie comparée identifie clairement les modes de coercition sexuelle mis en œuvre par les mâles, ce qui pourrait s'avérer utile pour les identifier dans l'espèce humaine, argumente-t-il.

MASSACRE À LA TRONÇONNEUSE
Thierry Gadault et Hugues Demeude

Cherche Midi, 2020
224 pages, 18 euros

Les journalistes signant cette enquête lancent d'abord une alerte sur la santé de la forêt, passant en revue les effets du climat, des bioagresseurs, des mégafeux, de la filière bois-énergie et du manque de forêts de montagne. Puis l'on découvre que, selon eux, l'État français serait animé depuis longtemps de la volonté de se débarrasser de l'œuvre forestière régalienne : après le démembrement des Eaux et Forêts dans les années 1960, l'ONF serait aujourd'hui sous-financé et poussé à vendre du bois, plus de bois... trop de bois. Cela se discute sans doute, mais ce livre informé intéressera tous ceux qui aiment la forêt.

QUELLES SCIENCES POUR LE MONDE À VENIR ?
Alain Grandjean et Thierry Libaert (dir.)

Odile Jacob, 2020
272 pages, 22,90 euros

« C'est notre expertise scientifique qui a permis de faire bouger les lignes », écrit Nicolas Hulot dans l'introduction, en faisant référence au Pacte écologique proposé par sa fondation et ratifié par tous les candidats de la dernière élection présidentielle. Des membres du comité scientifique conseillant la fondation depuis vingt ans passent ici en revue tous les rouages sociaux, qui, d'après leur analyse, mènent à s'opposer systématiquement aux avancées de la science, surtout quand elles révèlent les menaces induites par les effets du « progrès ».

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LE BIT, UNE UNITÉ SUPERFLUE ?

Malgré sa définition mathématique, le concept d'information est doté d'une unité. Un héritage qui provient sans doute de la physique.

Comme le temps, l'information est un concept difficile à définir.

Une grandeur, en physique, est formée d'un nombre et d'une unité. Par exemple, la distance entre Paris et New York est formée d'un nombre, 5834, et d'une unité, le kilomètre, ou alors d'un autre nombre, 3625, et d'une autre unité, le mille terrestre. Les concepts numériques à unité (distance, durée, masse, etc.) sont nombreux en physique, mais ils sont plus rares dans les autres sciences. Par exemple, en biologie, les concepts de vie, d'évolution, de cellule, etc. ne sont pas numériques. En mathématiques, de nombreux concepts, tel celui de distance, sont numériques, mais sans unité : le rayon du cercle trigonométrique, par exemple, est 1 et non 1 mètre. Et s'il faut que la distance entre deux points soit, d'un certain point de vue, 5834 et, d'un autre, 3625, les mathématiciens préfèrent définir deux métriques sur le même ensemble, plutôt que munir ces métriques d'unités. De même, la mesure d'un angle droit est $\pi/2$ et non $\pi/2$ radians.

La place centrale en physique des concepts numériques, avec ou sans unité, permet de résoudre, ou plutôt de contourner, un certain nombre de problèmes. Nous savons par exemple qu'il est difficile de définir le concept de temps – saint Augustin (354-430) écrivait déjà : « Qu'est-ce en effet que le temps ? Qui saurait en donner avec aisance et brièveté une explication ? » –, mais cela n'embarrasse pas trop les physiciens, parce qu'ils savent mesurer les durées. Ils savent donc utiliser le concept de temps. Ils en connaissent, de ce fait, la signification, même s'ils ne savent pas le définir.

> **Il aurait été facile de dire que la capacité d'un disque est 8 billions, plutôt que 8 térabits**

Qu'en est-il des concepts fondamentaux de l'informatique, les concepts d'algorithme, de machine, de langage et d'information, qui existaient tous avant l'informatique, mais que celle-ci a structurés en une science cohérente ? Les trois premiers ne sont pas numériques : il n'y a pas de quantité d'algorithme, de quantité de machine ou de quantité de langage. L'analyse de la durée de l'exécution des algorithmes, la théorie de la complexité, utilise certes une notion de durée, mais sans unité, car ces durées sont définies à une constante près. Le quatrième concept, celui d'information, est en revanche numérique et la quantité d'information s'exprime avec une unité : le bit et ses dérivés, l'octet, le kilooctet, le kibioctet, etc.

Cette quantité d'information étant le logarithme binaire d'un nombre de configurations ou de l'inverse d'une probabilité, il aurait pourtant été facile d'en faire un concept numérique sans unité, de dire que la quantité d'information contenue dans un chiffre décimal est $\log(10)/\log(2)$ qui vaut environ 3,32, plutôt que 3,32 bits. De même, il aurait été facile de dire que la capacité d'un disque est 8 billions, plutôt que 8 térabits.

D'où cette unité provient-elle donc ? Sans doute de ce que les pionniers Claude Shannon, Léon Brillouin, etc. qui ont développé cette notion quantitative d'information étaient davantage physiciens que mathématiciens ou, plus exactement, qu'ils voyaient l'information comme un concept davantage physique que mathématique. D'ailleurs, comme pour le temps, nous savons certainement mieux mesurer une quantité d'information que définir le concept d'information. Ce concept d'information, contrairement par exemple à celui d'algorithme, a donc une origine physique plus que mathématique.

De même que les fossiles sont des rémanences d'animaux et de végétaux aujourd'hui disparus ou que le rayonnement fossile est une rémanence de l'Univers primordial, le bit, seule unité de l'informatique, est une rémanence de l'origine physique de ce concept d'information. ■

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.

© Shutterstock.com/agsandrew

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	29 % de réduction *	**31 %** de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris – email : boutique@pourlascience.fr

PAG21STD

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER** — **59€** Au lieu de ~~82,80€~~ — D1459E
- 12 n° du magazine papier

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~114,40€~~ — P1A79E
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~ — I1A99E
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ..... Ville : .....

Téléphone .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque à l'ordre de Pour la Science**

☐ **Carte bancaire**

N° ....

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

Signature obligatoire :

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

TEINTURE CAPILLAIRE ET CRÉDIBILITÉ POLITIQUE

La cosmétique aide les personnalités politiques à consolider leur image et leur influence… sauf si elle laisse des traces s'échapper.

Une teinture capillaire peut-elle vous faire perdre toute crédibilité? Rudy Giuliani, l'avocat de Donald Trump, en a fait l'humiliante démonstration lors d'une conférence de presse donnée le 19 novembre au siège du parti républicain américain, à Washington. Au moment où il dénonçait un complot national à l'origine de la victoire du candidat démocrate Joe Biden, de grosses gouttes brun foncé ont dégouliné sur ses joues. Les réactions sur Twitter ne se sont pas fait attendre: le ruissellement de sa coloration pour cheveux était à l'image de «l'irrésistible débâcle de la maison Trump», des «allégations de fraude» qui ne tenaient pas… Des jeux de mots sur «dye» (teinture) et «dying» (mourir) ont qualifié le sort de l'homme politique.

Comment expliquer l'efficacité de l'analogie entre la cosmétique et la disqualification politique?

Bien que la teinture noire des cheveux de François Hollande ou celle, poivre et sel, de Laurent Wauquiez pour le vieillir aient suscité des commentaires parfois moqueurs, ce maquillage capillaire n'a pas été lié à leur bilan politique ou à un discrédit moral. N'oublions pas que nos hommes et femmes politiques constituent, pour reprendre les termes de l'historien et philosophe Marcel Gauchet, le «corps visible, faillible et mortel du corps invisible et perpétuel de la nation». Leur tenue publique

> **L'apparence ne saurait être négligée dans la fonction politique**

se doit de refléter la relation spéculaire entre gouvernés et gouvernants.

En d'autres termes, l'apparence ne saurait être négligée dans la fonction politique. Le maquillage comme camouflage des stigmates de la peau ou du vieillissement n'est donc pas incompatible avec une image de probité, qualité première plébiscitée par les Français pour la présidence de la République. Il est même un élément essentiel du costume général de la représentation politique.

Ainsi, l'exigence d'une tenue correcte dans l'hémicycle de l'Assemblée nationale, haut lieu de la représentation du peuple, exprime la force de l'articulation entre corps individuel, corps politique et corps social. Elle doit symboliser la réalité protéiforme des représentés en évitant de se confondre avec leur identité privée. Lorsqu'en 2019, Sibeth Ndiaye, ancienne porte-parole du gouvernement, présenta un compte rendu du Conseil des ministres en tenue colorée et décontractée, elle fut perçue comme un corps privé déritualisé qui échouait à se poser en métaphore du lien collectif. Une personnalisation vestimentaire excessive retentit sur la légitimité de la fonction. Intimité et proximité politique ne sont pas synonymes.

Plus encore, la cosmétique peut illustrer la déliquescence du corps politique lorsqu'elle devient *trace*. Sa qualité de maquillage s'évanouit alors et révèle les débordements du corps tels que la sudation de Rudy Giuliani. Moiteur sur le front, chemise trempée ou taches sous les bras: ces signes physiologiques renvoient à la ferveur politique ou, au contraire, à la fragilité humaine. On se souvient d'un Nixon transpirant et déstabilisé face à Kennedy qui s'imposait avec aisance lors du débat présidentiel américain de 1960. Mais la trace d'un colorant évoque la ruse, et fonde donc la suspicion.

Loin d'être futile, la cosmétique est une arme puissante susceptible de consolider ou de retirer toute crédibilité politique. Souvenons-nous des mots de Jacques Séguéla, conseiller en communication de François Mitterrand: «Si vous ne vous faites pas limer les canines […], vous susciterez toujours la méfiance […]. Vous ne serez jamais élu à la présidence de la République avec une denture pareille. Il faut ainsi chercher le pouvoir avec les dents, mais ne pas trop montrer les crocs!»■

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

des robots en milieux extrêmes

cycle de conférences

accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire

— les jeudis à 19h

© Esa - P. Carril

cité sciences et industrie

7 janvier

La Lune : les robots urbanisent le nouveau continent

Bernard Foing, directeur groupe international lunaire ILEWG, Esa /Estec, responsable SMART-1, première mission lunaire européenne, professeur à VU, Amsterdam.

14 janvier

Venise : des robots s'entraînent dans la lagune

Frédéric Boyer, professeur de robotique à l'IMT-A, chercheur au LS2N, Nantes.

21 janvier

Le désert : un robot inspiré d'une fourmi

Stéphane Viollet, directeur de recherche au CNRS, Institut des sciences du mouvement, Marseille.

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

© Getty Images

cité sciences et industrie

Covid-19, quels enseignements pour l'avenir ?

tables rondes et carte blanche

accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire

— à 19h

mardi 5 janvier

De l'émergence du virus à la pandémie

Serge Morand, écologue ; **Barbara Dufour**, vétérinaire ; **Frédéric Keck**, anthropologue.

mardi 12 janvier

La recherche sur le virus : alliance ou concurrence ?

Dominique Costagliola, épidémiologiste ; **Léo Coutellec**, maître de conférences en épistémologie et en éthique des sciences ; **Izabela Jelovac**, économiste.

mardi 19 janvier

Face à la crise sanitaire : des stratégies contrastées

Olivier Borraz, chercheur en sociologie du risque ; **William Dab**, épidémiologiste ; **Jocelyn Raude**, chercheur en psychologie sociale de la santé.

mardi 26 janvier

Covid-19, nos sociétés démasquées

Didier Fassin, sociologue ; **Mireille Delmas-Marty**, juriste.

jeudi 28 janvier

Carte blanche à Mathias Girel

Covid-19 : de la rumeur à la désinformation

Mathias Girel, maître de conférences au département de philosophie à l'ENS s'entoure de personnalités de son choix pour échanger sur un sujet qui lui tient à cœur.

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

Informations cite-sciences.fr

L'ESSENTIEL

> La Grande Tache rouge de Jupiter est un anticyclone d'une taille et d'une longévité exceptionnelles. Sa structure et sa dynamique restent à préciser.

> Des expériences en laboratoire et des simulations numériques renforcent l'hypothèse qu'il s'agit d'un tourbillon flottant.

> Les données de la sonde *Juno* permettront, dans les années à venir, d'en savoir plus sur la structure tridimensionnelle de ce tourbillon.

> Des tourbillons flottants, tels que les *meddies*, se forment aussi dans les profondeurs des océans de la Terre.

LES AUTEURS

DAPHNÉ LEMASQUERIER
doctorante à l'Irphé (Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre), à Marseille

BENJAMIN FAVIER
chargé de recherche du CNRS à l'Irphé

MICHAEL LE BARS
directeur de recherche du CNRS à l'Irphé

La Grande Tache rouge de Jupiter… en laboratoire !

De récentes expériences et simulations numériques indiquent que l'immense tempête qui persiste sur la planète géante depuis plusieurs siècles serait un « tourbillon flottant ». Un type de formation que l'on a aussi découvert dans les profondeurs des océans terrestres.

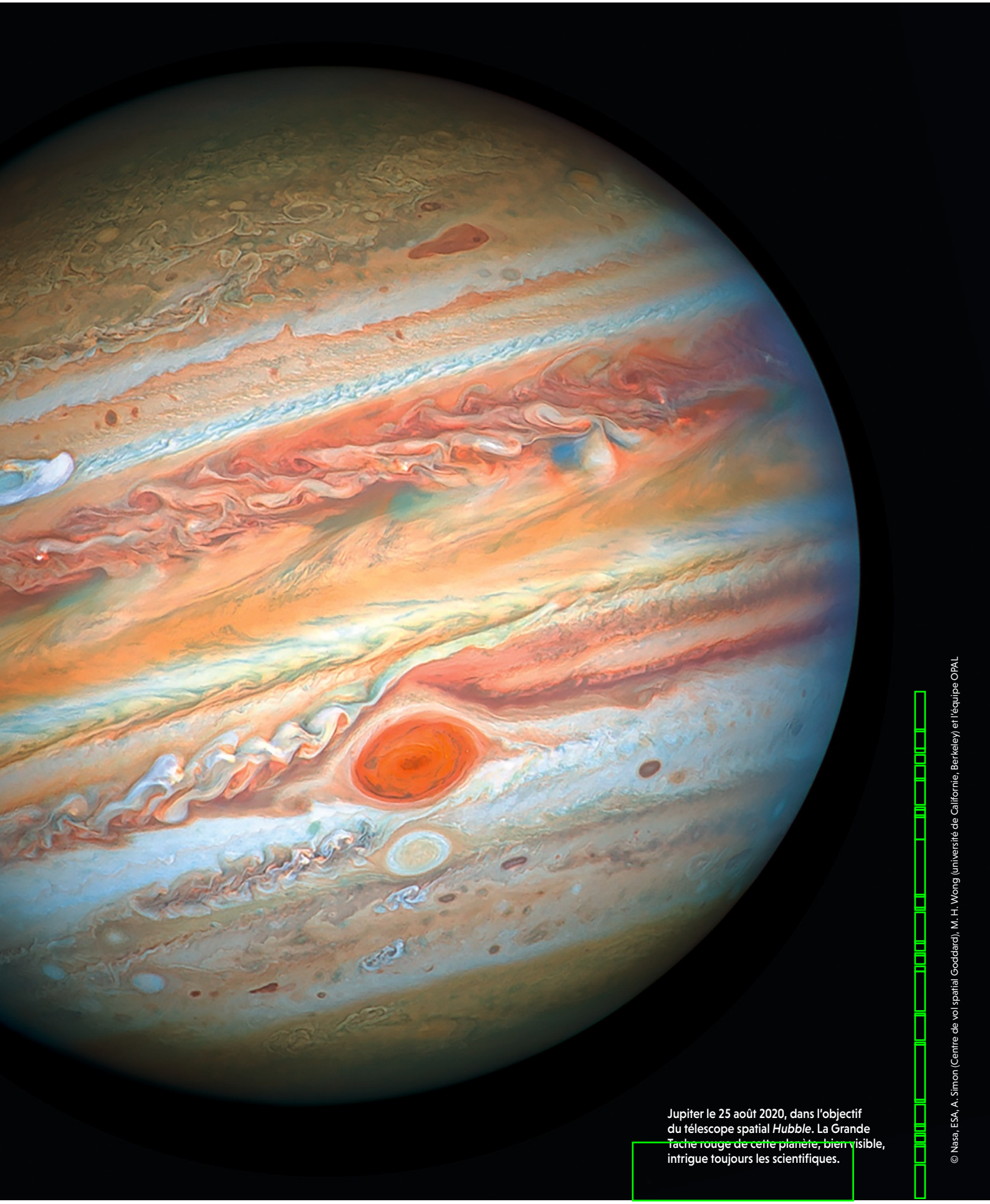
Avec des vents qui soufflent parfois à plus de 300 kilomètres par heure et une durée de vie moyenne d'une dizaine de jours, les cyclones sont parmi les phénomènes les plus spectaculaires dans l'atmosphère terrestre. Mais bien qu'impressionnants, ils sont sans commune mesure avec les tourbillons observés sur Jupiter. Le plus célèbre d'entre eux, la Grande Tache rouge, se déchaîne depuis au moins trois cents cinquante ans.

Grâce aux progrès des techniques d'observation de l'époque, Robert Hooke, en 1665, et Jean-Dominique Cassini, l'année suivante, ont été les premiers à mentionner la présence d'un énorme vortex dans l'hémisphère Sud de la planète géante. À partir du XX^{e} siècle, ces observations se sont multipliées avec les instruments au sol, le télescope *Hubble* en orbite autour de la Terre et les sondes spatiales (*Pioneer 10* et *11* en 1973 et 1974, *Voyager 1* et *2* en 1979, *Galileo* de 1995 à 2003 et *Juno* depuis 2016). Ces données ont révélé les caractéristiques spectaculaires de la Grande Tache rouge : sa forme elliptique (15 000 kilomètres de longueur pour 12 000 kilomètres de largeur en 2015) peut contenir au moins une fois la Terre ! Et les vents y soufflent à près de 680 kilomètres par heure.

Pourtant, à ce jour, aucun modèle n'explique de façon satisfaisante comment une telle tempête géante peut se former et persister aussi longtemps au sein d'un environnement très turbulent.

L'atmosphère jovienne, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, présente plusieurs couches nuageuses constituées d'ammoniac (NH_3), de sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'hydrosulfure d'ammonium (NH_4SH). Des molécules chromophores, vraisemblablement liées aux éléments soufre et phosphore, et des cristaux de glace colorent ces nuages selon diverses teintes qui dépendent des conditions locales telles que la température.

Ces tons contrastés soulignent admirablement la dynamique de la planète. Celle-ci est ainsi striée par une dizaine de bandes stables et parallèles à l'équateur, associées à des vents intenses de 300 kilomètres par heure qui >



Jupiter le 25 août 2020, dans l'objectif du télescope spatial *Hubble*. La Grande Tache rouge de cette planète, bien visible, intrigue toujours les scientifiques.

© Nasa, ESA, A. Simon (Centre de vol spatial Goddard), M. H. Wong (université de Californie, Berkeley) et l'équipe OPAL

> cisaillent l'atmosphère d'est en ouest, ou l'inverse. Des centaines de «vortex» ou «tourbillons» circulent au sein de ces bandes et y fusionnent parfois. Ces vortex sont des cyclones lorsqu'ils tournent dans le même sens que la planète (sens antihoraire dans l'hémisphère Nord, horaire dans l'hémisphère Sud), et inversement pour les anticyclones. Près de 90% de ces vortex sont des anticyclones, de forme ovale assez régulière. Les cyclones, moins nombreux, ont en général des contours erratiques, allongés et filamentaires.

Dans un environnement aussi extrême et chaotique, il est difficile de comprendre la persistance de la Grande Tache rouge, dont les observations ont surtout été limitées à la seule couche de nuages de l'atmosphère. Or sa structure en profondeur peut certainement nous en dire plus sur sa longévité. Une piste intéressante est de supposer que ce tourbillon n'est pas profondément ancré dans l'intérieur de la planète, mais qu'il s'agit plutôt d'une structure superficielle, «flottant» dans l'atmosphère.

SONDER JUPITER EN PROFONDEUR

Actuellement en orbite autour de Jupiter, la sonde *Juno* devrait nous fournir des informations cruciales pour résoudre cette énigme (*voir l'encadré page 27*). Ses instruments explorent de façon indirecte l'intérieur jovien jusqu'à quelques centaines voire quelques milliers de kilomètres sous les nuages. Cet exploit est toutefois modeste lorsqu'on le rapporte au rayon équatorial, qui est de l'ordre de 70000 kilomètres ! Ces données aideront à ausculter la partie cachée du vortex et à mettre à l'épreuve l'idée que la Grande Tache rouge est un tourbillon flottant. Cependant, l'interprétation de ces nouvelles mesures est délicate et repose sur des modélisations qui impliquent des hypothèses encore débattues.

Pour renforcer la piste du tourbillon flottant, notre équipe a exploré des approches complémentaires à l'exploitation des mesures *in situ* de *Juno*. Nous avons conçu un dispositif expérimental et réalisé des simulations numériques dans des configurations simplifiées qui restituent à l'échelle du laboratoire certaines des conditions dominantes de la planète géante. Les résultats sont encourageants : nous montrons que les tourbillons flottants sont très stables et nous reproduisons certaines caractéristiques de la Grande Tache rouge, comme sa forme elliptique.

Pour former un tel tourbillon aussi bien dans une expérience de laboratoire que dans une simulation, quelques ingrédients sont indispensables. De façon générale, un tourbillon est une poche de fluide en rotation sur elle-même autour d'un axe bien défini, avec, à l'intérieur, des trajectoires fermées, circulaires ou elliptiques. Par conséquent, ce système n'échange pas ou peu de fluide avec le milieu environnant.

Nous sommes familiers avec ce type de structures, observées par exemple lorsqu'on vide un lavabo, mais aussi dans le sillage des avions ou encore dans les rivières, en aval des ponts. Ici, nous nous intéressons cependant à des tourbillons de bien plus grande taille, de sorte que le fluide est soumis à un effet supplémentaire : la rotation de la planète (la Terre ou Jupiter), ce qui n'est pas le cas d'un tourbillon de vidange. Les tourbillons à grande échelle se rencontrent dans l'océan et l'atmosphère, et nous les voyons quotidiennement sur les cartes météorologiques.

La formation d'un tourbillon se comprend de la façon suivante : tout d'abord, les variations de pression dans le fluide engendrent des écoulements des hautes pressions vers les basses pressions, puis ceux-ci sont déviés par la rotation de la planète, ou plus précisément par la force de Coriolis (*voir l'encadré page 28*). Le fluide, qui converge vers une région de basse pression (dépression), se met à tourner autour de celle-ci du fait de cette déviation, et forme un cyclone. De la même façon, le fluide qui diverge depuis une zone de haute pression forme un anticyclone.

Dans la Grande Tache rouge, les vents soufflent à près de 680 kilomètres par heure

Dans les années 1960, à partir des connaissances sur les cyclones de l'atmosphère terrestre, le Britannique Raymond Hide a réalisé les premiers modèles visant à expliquer l'origine de la Grande Tache rouge de Jupiter. Il est parti d'un écoulement purement bidimensionnel en supposant que l'épaisseur de l'atmosphère est négligeable et repose sur une surface solide (ou du moins bien plus visqueuse), à l'instar de la surface des continents ou des océans sur Terre. La Grande Tache rouge serait alors ancrée sur un relief particulier de cette surface. Cette hypothèse intervenait à une époque où l'on avait une vision très limitée de la composition et de la structure de la géante gazeuse. Or la situation sur Jupiter est en fait très différente.

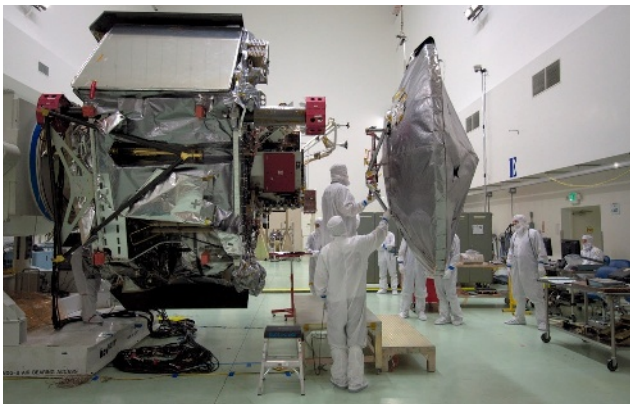
Sous les nuages joviens, il n'y a aucune surface solide, mais un mélange de gaz qui devient

LA MISSION JUNO

Lancée par la Nasa en 2011, la sonde spatiale *Juno* est en orbite autour de Jupiter depuis 2016. Pour étudier précisément la planète tout en évitant au maximum sa ceinture de radiations très intenses, *Juno* suit une trajectoire elliptique très allongée : avec une période de 53,5 jours, elle plonge au niveau du pôle Nord de Jupiter et se rapproche jusqu'à une distance de l'ordre de 3 500 kilomètres seulement au-dessus des nuages ; puis, dès qu'elle atteint le pôle Sud, elle s'éloigne de nouveau, jusqu'à 8,1 millions de kilomètres. Chacun des 36 survols prévus jusqu'en 2021 est l'occasion de nouvelles découvertes scientifiques, grâce à l'utilisation des huit instruments embarqués, alimentés par des panneaux solaires.

La caméra en lumière visible JunoCam fournit de fabuleuses images des nuages et de leur dynamique, avec une résolution impressionnante de 1 pixel pour 15 kilomètres. En complément de ces observations, des capteurs électromagnétiques et un détecteur de particules caractérisent l'atmosphère, tandis qu'un magnétomètre mesure le champ magnétique jovien, encore mal connu. Enfin, un radiomètre à microondes et un gravimètre à ondes radio sondent l'intérieur de Jupiter bien en dessous de la couche de nuages, pénétrant jusqu'à quelques centaines et quelques milliers de kilomètres respectivement : l'analyse des données ainsi fournies dévoile la dynamique jovienne interne, auparavant inaccessible.

Parmi les premières découvertes notables de *Juno*, on peut citer la présence d'une signature thermique de la Grande Tache rouge jusqu'à une profondeur de 300 kilomètres au moins, la pénétration des bandes de Jupiter jusqu'à une profondeur de 3 000 kilomètres, ou encore l'absence probable de noyau rocheux et métallique au centre de la planète, contrairement aux modèles communément admis. L'exploitation de ces données uniques sur la structure interne de la planète nécessite une collaboration étroite entre les chercheurs théoriciens, les spécialistes des simulations numériques et les expérimentateurs.



Assemblage en salle blanche de l'antenne à grand gain sur la sonde *Juno*.

© Nasa/Jack Pfaller

peu à peu liquide lorsqu'on s'enfonce vers l'intérieur de la planète. Sur Terre, les cyclones et anticyclones interagissent fortement avec les océans et les continents. Sur Jupiter, les tourbillons sont libres : ils flottent dans l'atmosphère et ne sont liés à aucune topographie. C'est d'ailleurs l'une des pistes explorées pour expliquer leur longévité : outre la rotation très rapide de Jupiter (un jour jovien dure 9 heures et 55 minutes) et la présence de vents zonaux intenses qui pourraient entretenir ces vortex, peu de processus dissipent l'énergie dans l'atmosphère de la planète du fait de cette absence de frottements sur une surface solide.

En 1988, Joël Sommeria, alors à l'université du Texas à Austin, et ses collègues ont mené une expérience en laboratoire avec une configuration dite « quasi bidimensionnelle ». L'idée est que la planète tourne tellement vite que la force de Coriolis empêche tout mouvement selon la verticale : le fluide se déplace en bloc selon des colonnes. Il est donc possible de s'abstraire de la dimension verticale dans ces études, bien que le système soit tridimensionnel. Simultanément, Philip Marcus, de l'université de Californie à Berkeley, a réalisé des simulations numériques de la même configuration. Les deux équipes ont observé un phénomène similaire où des petits tourbillons fusionnent et en alimentent un plus grand, comme on peut effectivement le constater sur Jupiter.

La structure en colonnes reste cependant une simplification de calcul. Si l'on suppose que les tourbillons de Jupiter sont vraiment libres et flottent dans l'atmosphère, ils ont une extension verticale limitée. Il faut dès lors s'intéresser au système tridimensionnel pour appréhender complètement leur structure, en particulier pour estimer leur épaisseur que l'on ne peut pas observer directement.

LE RÔLE DE LA STRATIFICATION

En 2012, Philip Marcus et ses collègues (dont l'un de nous, Michael Le Bars) ont proposé que la stratification de l'atmosphère jovienne est un ingrédient essentiel. La stratification désigne le fait que la densité du fluide n'est pas homogène : du fait des variations de température et de pression, la densité augmente lorsqu'on s'enfonce dans la troposphère ; autrement dit, le fluide est plus léger en surface qu'en profondeur. La forme des tourbillons provient alors d'un équilibre entre l'effet de la rotation de la planète, qui s'oppose à l'étalement des vortex, et l'effet de la stratification du milieu dans lequel ils flottent, qui favorise cet étalement (*voir l'encadré page 28*).

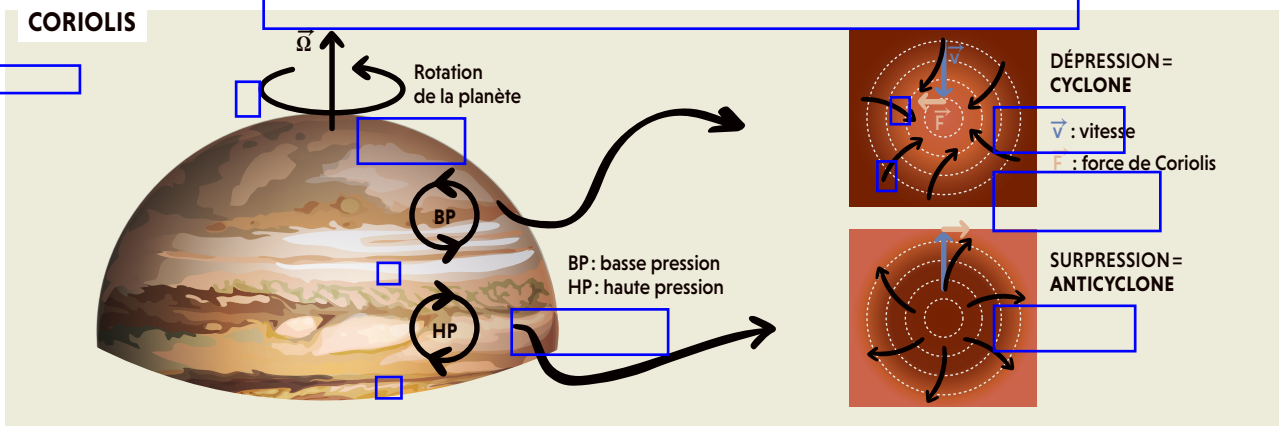
Plus précisément, le tourbillon adopte une forme lenticulaire plus ou moins aplatie selon l'intensité respective des forces liées à la rotation et à la stratification. À rotation constante, plus le milieu est stratifié, ou autrement dit plus la >

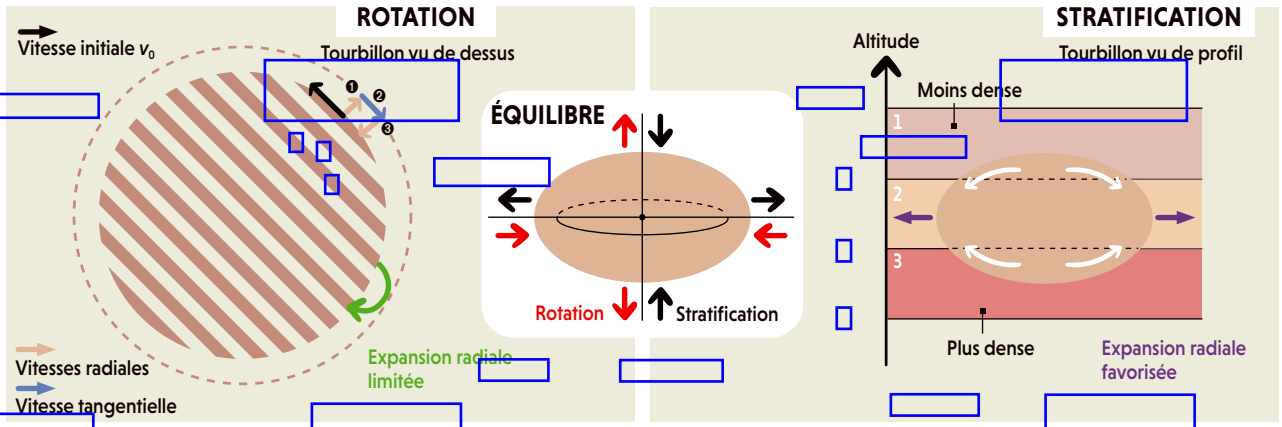
LES INGRÉDIENTS D'UN TOURBILLON FLOTTANT

L'atmosphère de Jupiter est un système complexe à modéliser où de nombreux effets se manifestent simultanément (turbulence, échanges thermiques, compressibilité, etc.). Néanmoins, il est possible d'isoler les principaux facteurs impliqués dans la formation d'un tourbillon flottant : la force de Coriolis, la rotation du cyclone (ou de l'anticyclone) et la stratification de l'atmosphère.

❶ EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS

Pour une planète qui tourne sur elle-même dans le sens antihoraire (autour de l'axe qui suit la direction du vecteur $\vec{\Omega}$), la rotation engendre la force de Coriolis, notée ici **F**. Celle-ci dévie vers la droite dans l'hémisphère Nord (vers la gauche dans l'hémisphère Sud) tout mouvement horizontal de masses fluides à grande échelle. Une zone de basse pression (dépression) forme ainsi un cyclone, alors qu'une région de haute pression forme un anticyclone.





❷ EFFET DE LA ROTATION

Si le vortex (supposé de vitesse v_0 à ses bords) commence à s'étaler horizontalement, son rayon augmente avec une vitesse radiale ❶. La force de Coriolis dévie alors vers la droite les particules du fluide qui s'éloignent du centre, ce qui engendre une vitesse tangentielle ❷. La force de Coriolis, qui s'exerce en continu, tend au final à ramener le vortex à son rayon initial ❸. L'expansion du vortex est donc limitée.

❸ EFFET DE LA STRATIFICATION

Le vortex est une poche de fluide de densité homogène plongée dans un milieu stratifié. Son sommet, entouré par un milieu moins dense que lui (couche 1), tend à s'enfoncer. Au contraire, la base du vortex, située dans un milieu plus dense que lui (couche 3), tend à monter. La stratification agit comme une presse qui aplatit le vortex dans un plan horizontal. L'expansion radiale du vortex est ainsi favorisée.

❹ EQUILIBRE

Les effets de la rotation et de la stratification s'opposent et s'équilibrent : le vortex se stabilise dans une forme ellipsoïdale. Si la rotation est très rapide alors que le milieu est peu stratifié, l'ellipsoïde ne peut pas s'étaler et s'allonge verticalement, alors qu'en cas de rotation lente ou de forte stratification, l'ellipsoïde est aplati et prend la forme d'une lentille.

© Shutterstock.com / Azuzl - Pour la Science

> densité augmente rapidement, plus le vortex est aplati. Ce vortex ne repose sur aucune surface solide, mais son extension verticale reste limitée: on a alors un tourbillon flottant.

Mais ces considérations simples sur l'origine et l'équilibre des tourbillons flottants ne suffisent pas pour déterminer si la Grande Tache rouge correspond à un tel objet. La principale raison est que les vortex joviens font partie d'une dynamique globale extrêmement riche, où de nombreux effets coexistent et interagissent (la présence de vents zonaux, la turbulence, les effets de compressibilité liés aux gaz, les effets thermiques, etc.). Les étudier au sein d'un modèle complet de circulation planétaire est donc une étape décisive, mais il est difficile de démêler et d'analyser dans ce type de simulation l'influence de chaque paramètre.

Une approche consiste à isoler chaque effet physique dans un modèle simplifié pour en comprendre l'impact sur les propriétés des vortex. Par exemple, en 2019, nous nous sommes concentrés sur l'action des jets zonaux qui encadrent au nord et au sud la Grande Tache rouge et exercent des forces de cisaillement, donnant ainsi au vortex une forme ellipsoïdale plutôt que circulaire.

UNE PLANÈTE DANS UN AQUARIUM

Notre étude est d'abord expérimentale: le défi est de faire rentrer le tourbillon de la Grande Tache rouge de Jupiter dans une cuve dont les dimensions sont de l'ordre du mètre, un rapport d'échelle de plus de 1/10000000! Cette réduction phénoménale de la taille du tourbillon doit être compensée par d'autres paramètres de l'expérience afin que la dynamique principale reste la même, en suivant le principe de similitude (*voir l'encadré page 32*). Dans notre cas, il est possible de compenser en partie le rapport d'échelle par une augmentation de la vitesse de rotation et une stratification plus marquée par rapport à Jupiter.

Pour réaliser notre Grande Tache rouge au laboratoire (*voir la figure page 30*), nous utilisons une cuve de section carrée de 50 centimètres de côté et de 70 centimètres de hauteur. Cette cuve est remplie d'eau salée et tourne rapidement selon un axe vertical (5 tours par minute), ce qui simule la rotation de la planète.

Et la stratification? Sur Jupiter, l'illumination solaire couplée à l'augmentation de pression avec la profondeur rend les couches superficielles de gaz de la troposphère plus légères que les couches plus enfouies. Dans notre expérience, faire appel à un liquide tel que l'eau plutôt qu'un gaz présentait de nombreux atouts. Par exemple, pour reproduire les variations de densité et l'effet de stratification, il suffit d'incorporer du sel dans l'eau, à des concentrations de plus en plus importantes à mesure que l'on s'enfonce dans la cuve: l'eau est ainsi plus légère en surface qu'en profondeur.

Grâce au principe de similitude (*voir l'encadré page 32*), nous pouvons obtenir à l'échelle du laboratoire les bons rapports entre les forces qui définissent l'équilibre du vortex. Par exemple, le rapport entre la rotation et la stratification est du même ordre de grandeur dans notre expérience et sur Jupiter. Enfin, pour simuler les jets zonaux, nous utilisons une membrane flexible entraînée par plusieurs cylindres, une sorte de tapis roulant vertical immergé dans la cuve (*voir la figure page 30*). En entraînant le fluide, la membrane crée un cisaillement analogue à celui produit par deux vents soufflant dans des directions opposées.

Le vortex est ensuite créé en injectant du fluide (de l'eau de salinité intermédiaire, parfois teintée avec un colorant fluorescent) au milieu de la cuve, entre les deux membranes. Le fluide est injecté au moyen d'un tube fin qui ne tourne pas avec la cuve. Pour un observateur plongé dans la cuve en mouvement (comme s'il était sur la planète), ce fluide extérieur apparaît comme tournant avec une rotation égale, mais opposée à celle de la table: on parle alors d'un tourbillon anticyclonique, ce qui est le cas de la plupart des vortex joviens.

Une fois le vortex créé, il est possible de suivre son évolution et sa forme. En introduisant dans le fluide injecté des petites particules flottantes réfléchissantes et en éclairant la cuve à l'aide de nappes de lumière laser, nous mesurons le déplacement des particules et nous en déduisons la vitesse du fluide au cours du temps, technique nommée «vélocimétrie par images de particules».

Nous obtenons un tourbillon de forme lenticulaire (de quelques centimètres) dont les trois axes sont de longueurs différentes (*voir la figure page 30*). Cette approche expérimentale a été complétée par des simulations numériques, consistant à résoudre les équations du mouvement du fluide dans la géométrie définie par l'expérience. Ces simulations ont permis de mieux comprendre l'expérience en nous donnant accès aux vitesses et à la densité du fluide dans tout l'espace (alors qu'expérimentalement, nous ne mesurons que les vitesses dans un plan) et en quantifiant les effets dus aux bords de la cuve. Cependant, une fois le dispositif expérimental mis au point, il est plus rapide de le faire fonctionner que de réaliser les calculs numériques.

Grâce au bon accord entre l'étude expérimentale et l'analyse numérique du problème, nous avons montré comment ses différents paramètres (rotation, stratification et cisaillement) contribuent à produire un vortex stable de forme ellipsoïdale.

Quelles informations peut-on tirer de ces travaux pour comprendre le cas particulier de >

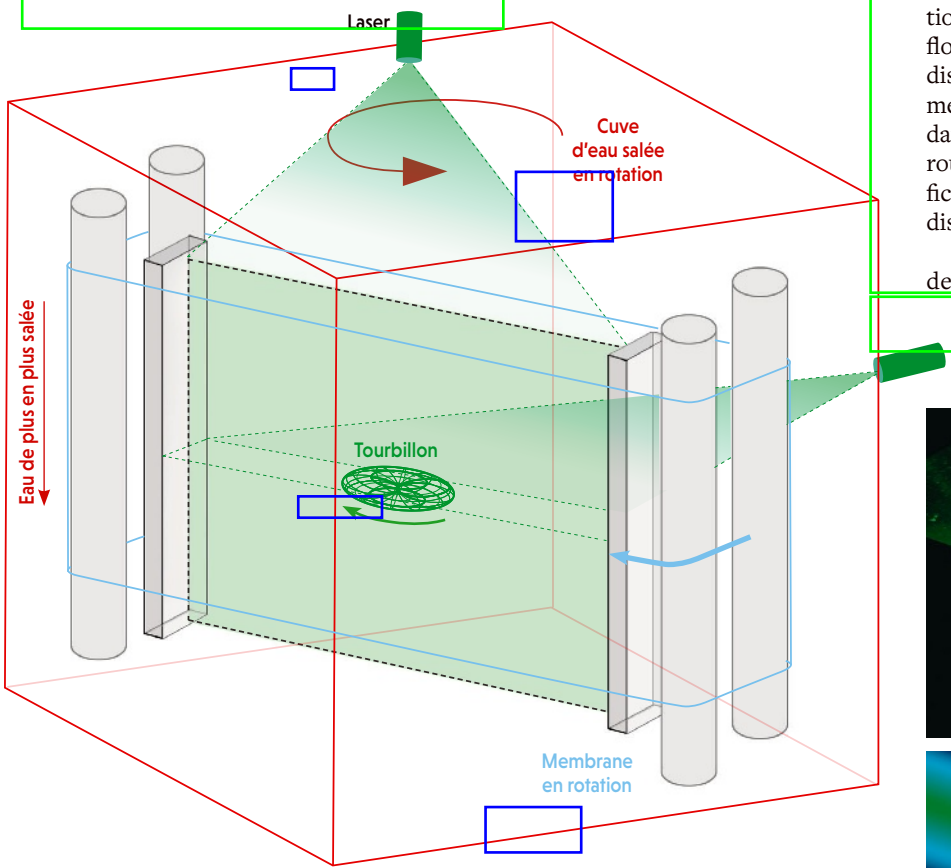
> Jupiter? Malgré la nature extrêmement chaotique de l'atmosphère jovienne, l'équilibre des forces qui gouverne la forme globale des tourbillons est le même, au premier ordre d'approximation, dans notre expérience et sur Jupiter. À partir des paramètres évalués grâce aux mesures de surface sur Jupiter (vitesse de rotation des tourbillons et de la planète, différence de densité entre les tourbillons et l'atmosphère environnante, vitesse des vents qui cisaillent les vortex), notre modèle permet de prédire la forme tridimensionnelle de ces structures naturelles. En connaissant notamment leurs dimensions horizontales, nous pouvons estimer leur profondeur, donnée pour l'instant inaccessible à cause de l'opacité de l'atmosphère jovienne.

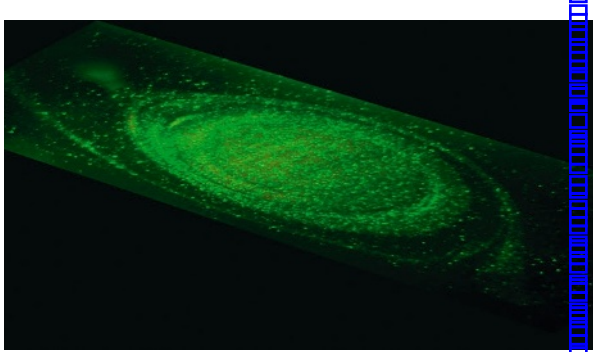
Ainsi, en appliquant nos résultats aux tourbillons joviens, nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes: les vortex sur Jupiter ont une forme fortement aplatie et sont finalement très peu profonds, à savoir pour la Grande Tache rouge quelques centaines de kilomètres pour une taille horizontale de plus d'une dizaine de milliers de kilomètres! Notre connaissance de la dynamique de Jupiter se précise: les multiples taches ovales seraient des vortex très superficiels, piégés au sein de jets zonaux qui, eux, pénètrent sur plusieurs milliers de kilomètres à l'intérieur de la planète. Il est maintenant crucial de voir si cette géométrie sera confirmée par les mesures de *Juno*.

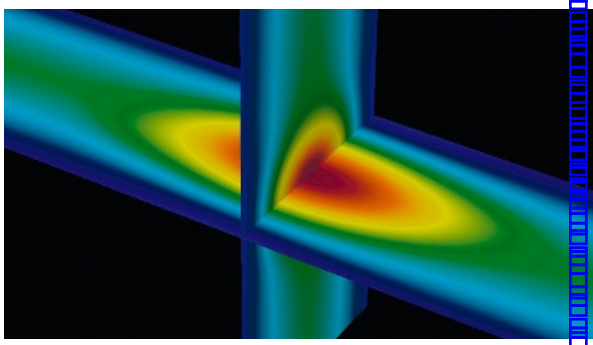
Il est également intéressant de considérer le cas particulier de la Grande Tache rouge sur toute la durée de son évolution. On sait par exemple que l'étendue horizontale de celle-ci rétrécit depuis au moins quarante ans (sa longueur est passée de 22000 kilomètres en 1996 à 15000 kilomètres en 2015), alors que sa vitesse de rotation augmente. Nos travaux montrent que malgré cette évolution, les divers effets en jeu se compenseraient de telle façon que l'épaisseur du tourbillon resterait constante. Certains pensent que ce vortex géant pourrait néanmoins finir par disparaître, mais il pourrait aussi s'agir d'une évolution réversible.

Dans notre expérience, nous ne pouvons pas encore reproduire cette évolution lente de la Grande Tache rouge. En nous limitant aux forces dominantes, nous obtenons une situation d'équilibre avec la formation de tourbillons flottants stables. Il est probable que les effets dissipatifs, comme la turbulence et le rayonnement de chaleur vers l'espace, jouent un rôle clé dans l'évolution de la taille de la Grande Tache rouge. Dans la cuve, ces phénomènes sont difficiles à reproduire, car l'énergie y est surtout dissipée par un autre processus, la viscosité.

Nos résultats expérimentaux fournissent des indications sur ce qui se passe sur la

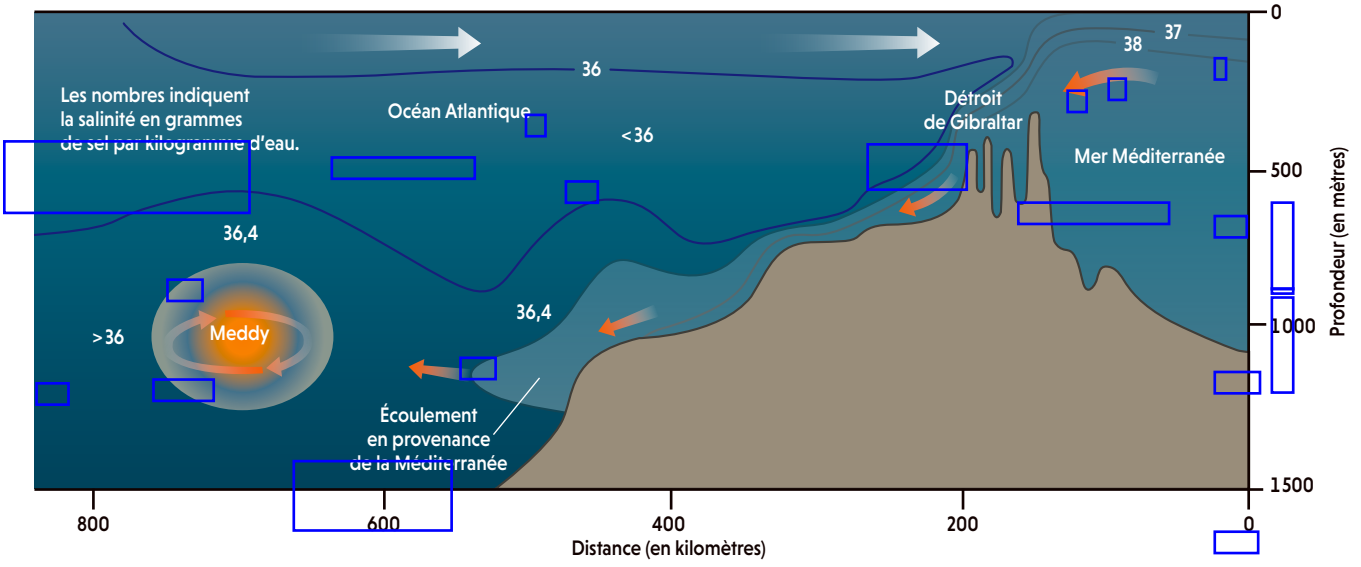






L'équipe de l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé) a reproduit les ingrédients physiques principaux qui régissent la dynamique des vortex sur Jupiter grâce à une cuve remplie d'eau et mise en rotation. Dans cette cuve, une membrane *(contours bleus)* tournant autour de rouleaux restitue les contraintes de cisaillement des jets zonaux. Enfin, un gradient de salinité dans l'eau permet d'engendrer une stratification verticale. Les chercheurs ont formé au centre du dispositif un tourbillon flottant *(photographié en haut à droite)*, qu'ils reproduisent aussi dans une simulation numérique *(en bas à droite, les couleurs chaudes matérialisent une pression de plus en plus élevée)*.

© Pour la Science et D. Lemasquerier et al.



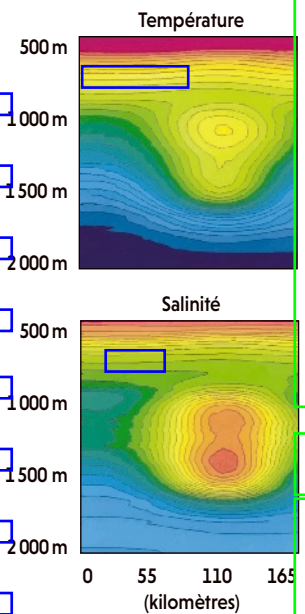
LES *MEDDIES* DE L'ATLANTIQUE

De façon surprenante, des tourbillons flottants se forment aussi dans les océans terrestres. Les plus connus sont les *meddies*. L'eau chaude et salée de la mer Méditerranée s'écoule dans l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar. Elle s'enfonce jusqu'à atteindre une densité équivalente vers 1000 mètres de profondeur. Ce courant, soumis à la force de Coriolis due à la rotation de la Terre, peut alors former des tourbillons qui se déplacent horizontalement et vers l'ouest. Ils mesurent environ 600 mètres de hauteur pour près de 100 kilomètres de diamètre et forment donc des lentilles d'eau très aplaties.

planète, mais il faut rester prudent quant à la transposition de ces données à la situation réelle. Les prochaines étapes de notre étude consisteront à raffiner ce modèle en incorporant davantage d'ingrédients physiques, de façon contrôlée afin de bien comprendre l'action de chaque paramètre.

Par exemple, une différence importante entre un liquide et un gaz est la compressibilité: il est très difficile de réduire le volume d'un liquide, tandis qu'il est possible de comprimer un gaz à la main, comme dans une pompe à vélo. Ces effets de compressibilité sont importants pour la dynamique de l'atmosphère gazeuse de Jupiter, et il serait possible de les quantifier numériquement. Dans le cas de la Grande Tache rouge, ces effets déformeraient sans doute le tourbillon dans sa direction verticale avec une asymétrie de part et d'autre du plan équatorial: sa «racine» serait moins profonde dans les zones denses en dessous et sa «tête» serait plus haute dans les zones peu denses.

Il est aussi crucial de discuter les limites de notre modèle et de le comparer aux théories existantes et à des simulations numériques plus détaillées de la dynamique jovienne, qui ont l'avantage d'être plus complètes, mais dont les temps de calcul se comptent en mois (et dépassent parfois un an) sur des supercalculateurs et où il est plus difficile de séparer les différents phénomènes les uns des autres. Par exemple, en 2015,



Les *meddies* sont identifiables lors de sondages verticaux dans la colonne d'eau. Ils forment des poches d'eau anormalement chaude *(en haut)* et salée *(en bas)*.

Moritz Heimpel, de l'université de l'Alberta, au Canada, et ses collègues ont simulé pour la première fois l'intérieur liquide de Jupiter et son atmosphère, reproduisant simultanément des jets zonaux profonds et des tourbillons superficiels. Toutes ces approches sont complémentaires et s'enrichissent mutuellement. La convergence des résultats permettra de percer le secret de la Grande Tache rouge de Jupiter.

Les tourbillons flottants dont nous avons discuté jusqu'à présent sont liés à l'environnement de Jupiter. Ils ont un parfum d'exotisme et de monde lointain aux conditions extrêmes. Pourtant, les ingrédients qui contribuent à la formation et à la stabilité des tourbillons joviens sont présents dans de nombreux systèmes géophysiques et astrophysiques. Du fait de l'aspect universel des mécanismes en dynamique des fluides (*voir l'encadré page 32*), on s'attend à observer des structures tourbillonnaires flottantes ailleurs que sur Jupiter.

DES TOURBILLONS FLOTTANTS DANS LES OCÉANS

Et c'est effectivement le cas, par exemple dans les océans terrestres! Les océans sont soumis à la rotation de la Terre et sont globalement stratifiés en raison des variations de salinité et de température. Alors que l'hypothèse des tourbillons flottants reste à confirmer pour les vortex joviens, l'existence de tourbillons flottants dans les océans terrestres ne fait aucun doute. Les plus connus sont les *meddies* de l'océan Atlantique (*meddy* est la contraction de l'anglais *mediterranean eddy*, «tourbillon méditerranéen»).

Il s'agit de grands anticyclones constitués d'eau chaude et salée, d'un diamètre compris entre 40 et 100 kilomètres pour une épaisseur de 600 à 1000 mètres, flottant à une profondeur d'environ 1000 mètres sous la surface de >

© Charlotte Calament, d'après P. L. Richardson, American Scientist, vol. 81(3), 1993 *(en haut)*; © P. L. Richardson et al., Progress in Oceanography, vol. 45(2), pp. 209-250, 2000 *(au centre)*

QUAND JUPITER EST CONSTITUÉE DE MIEL !

Les équations de Navier-Stokes décrivent le mouvement de fluides dont les propriétés peuvent être très diverses. Elles s'appliquent à des fluides visqueux ou non, à un liquide tel que l'eau ou à un gaz tel que l'air, qui sont pourtant bien différents. Par exemple, l'air est compressible, c'est-à-dire qu'on peut réduire un volume donné en le comprimant, augmentant ainsi sa densité, ce qui n'est quasiment pas le cas pour l'eau. Même certains fluides aux comportements exotiques n'échappent pas à ces équations (c'est le cas des fluides « non newtoniens » comme le sang ou l'eau additionnée de fécule de maïs).

Le caractère universel des équations de Navier-Stokes a des conséquences étonnantes. En particulier, elles sont valables à l'échelle d'une tasse de café comme à l'échelle d'une tempête dans l'atmosphère de Jupiter. Cette universalité permet de reproduire en laboratoire certains phénomènes physiques observés dans les fluides naturels en changeant leur taille, voire en modifiant la nature du fluide : sous réserve que l'on respecte l'amplitude relative des différentes forces mises en jeu, la dynamique sera la même.

Prenons l'exemple de la convection dans le manteau terrestre. Ces mouvements sont responsables de la tectonique des plaques et agissent à des échelles de l'ordre du millier de kilomètres et à des vitesses de l'ordre du centimètre par an. Ils sont engendrés par les différences de densité entre la roche très chaude à la base et celle plus froide, et donc plus dense, au sommet du manteau. Cette dynamique convective est dominée par les effets de viscosité. Il est possible de la reproduire de façon simplifiée dans une maquette haute de 15 centimètres en chauffant par le bas un fluide visqueux (solution de cellulose par exemple) pour établir un contraste de température de l'ordre de quelques dizaines de degrés. On respecte alors le rapport entre les forces de flottabilité (la solution chauffée tend à s'élever car elle est moins dense) et les forces visqueuses qui s'opposent à cette élévation, tel qu'on l'estime dans le manteau. On reproduit ainsi un phénomène de très grande envergure dans une maquette réduite.

À l'inverse, il est possible de reproduire à taille humaine des phénomènes ayant lieu à toute petite échelle. Par exemple, les flagelles qui assurent la propulsion de certaines bactéries mesurent quelques micromètres de longueur et peuvent osciller plusieurs dizaines de fois par seconde. En laboratoire, on les modélise avec des hélices centimétriques, qui tournent dans un bain de glycérine à une vitesse de l'ordre d'un tour toutes les dix secondes. Cette fois-ci, la mécanique des fluides observée y est la même car on respecte le rapport entre les forces d'inertie et la viscosité : si on augmente la taille du flagelle, il est nécessaire de réduire sa vitesse de rotation.

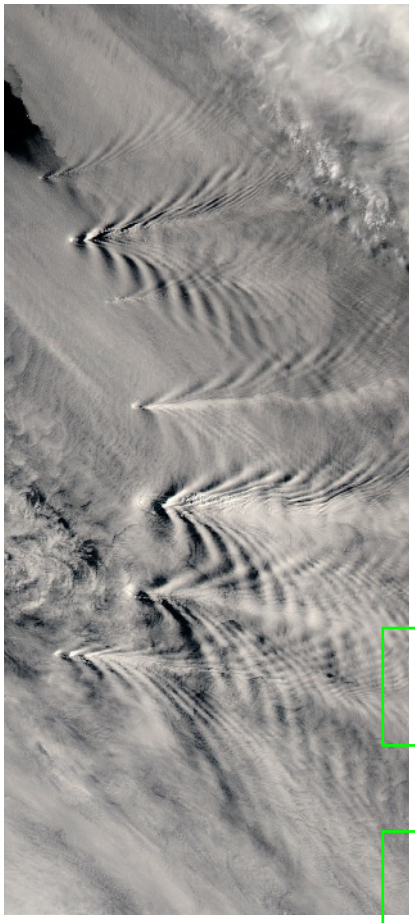
> **On respecte la similitude pour imiter le phénomène à une autre échelle**

Dans ces deux exemples, hormis la simplification drastique du système, il est possible d'atteindre le régime naturel (planétaire ou biologique) grâce à cette notion de similitude. Malheureusement, il n'est pas toujours possible d'obtenir une similitude exacte. C'est le cas par exemple des phénomènes de grande envergure et très peu visqueux (dominés par l'inertie). Modéliser en laboratoire l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion à vitesse de croisière (environ 800 kilomètres par heure) est très difficile, puisqu'en réduisant la taille de l'aile, nous donnons artificiellement plus de poids aux effets visqueux, et il faudrait en théorie augmenter la vitesse d'un même facteur !

Dans l'étude expérimentale des vortex joviens, on se heurte à un problème similaire. Il est possible de compenser la réduction de la taille du vortex par une augmentation du taux de rotation (un jour jovien correspond à un peu moins de dix heures, notre expérience réalise un tour en seulement douze secondes). Hélas, cette augmentation du taux de rotation n'est pas suffisante pour reproduire rigoureusement l'équilibre de forces présent dans l'atmosphère de Jupiter : il faudrait pour cela que notre cuve tourne beaucoup, mais alors, beaucoup plus vite ! Cet inévitable écart entre l'expérience de laboratoire et la réalité peut s'interpréter comme une modification de la viscosité du fluide, comme si Jupiter était constituée de miel, beaucoup plus visqueux que les gaz constituant l'atmosphère jovienne. L'écoulement que nous étudions est donc beaucoup plus calme que la réalité, même s'il partage *a priori* les mêmes propriétés à grande échelle.

Lorsqu'il est impossible de respecter tous les équilibres de force, l'objectif est alors de faire des compromis en se concentrant sur les équilibres les plus importants, puis en faisant varier les autres paramètres afin de sonder la réponse du système. On peut ensuite extrapoler les résultats expérimentaux aux systèmes réels, en les comparant aux observations.

D. L., B. F. et M. L. B.



Les îles Sandwich, dans l'Atlantique, provoquent un sillage dans l'atmosphère, souligné par la forme des nuages. Le cygne trace la même figure sur l'eau. C'est une manifestation du principe de similitude.

© J. Descloitres, MODIS Land Rapid Response Team, Nasa GSFC (*à gauche*) ; © Smiler99 / shutterstock.com (*à droite*)

> l'océan (*voir la figure page 31*). À cause de leur forme, on parle aussi de lentilles d'eau.

Leur découverte à la fin des années 1970, au cours d'une campagne en mer au large des Bahamas, a été une surprise. En effet, la dynamique profonde de nos océans n'est pas observable à l'œil nu, même qualitativement, ce qui explique que ces tourbillons océaniques soient si longtemps passés inaperçus. En revanche, une fois qu'ils sont repérés, leur caractérisation est bien plus aisée que sur Jupiter, même si cela nécessite des campagnes en mer de grande envergure.

Par exemple, les meddies engendrent typiquement des anomalies d'élévation de la surface de la mer de l'ordre de 10 centimètres, qu'il est possible de détecter. La réalisation de profils verticaux de température et de salinité contribue aussi à les révéler (*voir les figures page 31*), comme ce fut le cas lors de leur découverte. Enfin, une fois les meddies découverts, les scientifiques ont piégé des bouées sous-marines au sein de ces tourbillons afin de suivre leur évolution sur plusieurs semaines.

La formation des meddies s'explique aujourd'hui par les échanges d'eau entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée au niveau du détroit de Gibraltar. L'eau de la Méditerranée, plus dense que celle de l'Atlantique, s'écoule dans le golfe de Cadix et plonge le long du talus continental jusqu'à atteindre une profondeur d'équilibre, où la densité de l'océan froid est égale à celle de l'eau en provenance de la Méditerranée, plus chaude, mais aussi plus salée. Le courant avance alors horizontalement. Mais, soumis à la force de Coriolis, il s'enroule suivant la direction anticyclonique. Les vitesses de rotation au sein du meddy peuvent alors atteindre 50 centimètres par seconde. Une fois bouclé, le tourbillon ainsi formé se détache du courant et isole efficacement sa masse d'eau méditerranéenne des abysses environnants.

Il se forme sur ce principe de 15 à 20 meddies par an, et ceux-ci ont une durée de vie moyenne de 1,7 an. Certains disparaissent rapidement, du fait d'un bouclage incomplet, suite aux interactions avec divers courants sous-marins, ou à des collisions avec des monts sous-marins. D'autres parviennent cependant à s'échapper du bassin des Canaries et voyagent alors à travers l'océan Atlantique à une vitesse de l'ordre 3,5 kilomètres par jour, pour venir s'écraser, au bout de quatre à cinq ans, sur les côtes de l'Amérique du Sud. On retrouve donc ici l'une des signatures des tourbillons flottants, déjà mise en avant par la Grande Tache rouge de Jupiter : leur longue durée de vie et leur persistance remarquable dans un environnement pourtant chaotique.

Les meddies font partie intégrante de la circulation océanique globale. Du fait de leur longévité et de leur taille, ils transportent sur de grandes distances des quantités importantes de chaleur et de sel (100 milliards de tonnes de sel pour un seul meddy !). Ils constituent ainsi un apport permanent de sel dans l'océan Atlantique Nord. Sans cet apport, la circulation océanique globale, dite « thermohaline », qui aide à redistribuer la chaleur liée au chauffage solaire des tropiques vers le pôle Nord pourrait être réduite, conduisant à de plus faibles températures dans des régions comme le nord-ouest de l'Europe, qui connaît aujourd'hui un climat tempéré. Même si la circulation océanique globale dépend de nombreux autres facteurs, comme la quantité d'eau douce relarguée par la fonte des glaces au pôle Nord, les meddies pourraient y jouer un rôle non négligeable. Ils constituent donc des acteurs potentiellement importants de l'évolution du climat de la planète.

UN PHÉNOMÈNE UNIVERSEL

Notons que l'on a observé d'autres tourbillons flottants, similaires aux meddies mais plus petits, en divers endroits de la Terre, grâce à la multiplication des campagnes en mer, ce qui souligne de nouveau l'universalité de ces structures : par exemple au niveau du Gulf Stream, dans l'océan Arctique, ou encore dans le golfe de Gascogne. On a aussi découvert des lentilles d'eau de la mer Rouge flottant dans la mer d'Arabie.

D'autres structures relevant de la même dynamique des fluides ont été identifiées cette fois-ci à la surface des océans, par exemple des tourbillons d'eau de l'Amazone (douce et donc peu dense par rapport à l'eau salée des océans) qui remontent le long des côtes de l'Amérique du Sud jusqu'au golfe du Mexique, transportant d'importantes quantités de nutriments pour le plus grand bonheur des poissons… et des pêcheurs. Toutes ces structures font actuellement l'objet d'études approfondies de la part des océanographes.

Ce phénomène de tourbillon flottant ne se limite pas à Jupiter et aux océans terrestres. Il pourrait aussi se manifester dans les disques protoplanétaires, ces structures de gaz et de poussières en rotation autour d'étoiles jeunes, au sein desquels se forment les planètes. La répartition des poussières ainsi que la gravité due à l'étoile contribuent à une stratification du disque. Les ingrédients sont ainsi tous en place pour imaginer que des tourbillons flottants de gaz et de poussières se forment. Ils pourraient même constituer les graines des futures planètes, en amorçant l'agglomération rapide de matériaux de taille micrométrique. Ce scénario est encore vivement débattu, mais l'étude de Jupiter montre que nous avons de nombreux moyens, théoriques et expérimentaux, pour mettre à l'épreuve des modèles de phénomènes qui se passent très loin de nos laboratoires. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Lemasquerier *et al.*, **Remote determination of the shape of Jupiter's vortices from laboratory experiments,** *Nature Physics*, vol. 16, pp. 695-700, 2020.

M. Heimpel *et al.*, **Simulation of deep-seated zonal jets and shallow vortices in gas giant atmospheres,** *Nature Geoscience*, vol. 9, pp. 19-23, 2016.

O. Aubert *et al.*, **The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows : experiments and observations,** *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 706, pp. 34-45, 2012.

P. Hassanzadeh *et al.*, **The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows : theory and simulation,** *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 706, pp. 46-57, 2012.

P. L. Richardson *et al.*, **A census of meddies tracked by floats,** *Progress in Oceanography*, vol. 45(2), pp. 209-250, 2000.

Contrer les mauvais coups du coucou

La coévolution entre des oiseaux parasites, tels que les coucous, et leurs hôtes a produit d'étonnantes adaptations. Une course aux armements qui touche toutes les étapes du cycle de reproduction des oiseaux.

Perchée sur une branche, une petite rousserolle verderolle (*Acrocephalus palustris*) est accaparée par ses devoirs parentaux: elle tente de nourrir un insatiable coucou gris (*Cuculus canorus*), beaucoup plus grand qu'elle et qui tient à peine dans le minuscule nid de la rousserolle (*photographie ci-contre*). Cette scène, fréquente dans les bois et les zones marécageuses d'Europe à la fin du printemps, illustre le comportement reproductif étonnant de certains oiseaux: le «parasitisme de couvée». Au lieu de construire leur propre nid, les parasites de couvée déposent leurs œufs dans les nids d'autres espèces, hôtes qui se préoccuperont de couver les œufs étrangers et de prendre soin des oisillons qui en seront issus.

Or ce comportement ne se limite pas à la ponte dans le nid d'un tiers. Lors des premiers jours qui suivent sa naissance, le coucou escalade les parois du nid en portant sur son dos l'œuf pondu par son hôte, ou l'oisillon de l'hôte, dans le seul but de l'expulser du nid, action qu'il répétera autant de fois qu'il y a d'œufs ou d'oisillons. En éliminant la concurrence, le coucou parasite s'assure que les soins apportés par ses parents adoptifs se concentreront sur lui seul.

Quels sont, pour le coucou, les avantages de ce comportement inhabituel? La première explication du parasitisme de couvée, en termes d'évolution, a été proposée par Charles Darwin dans *L'Origine des espèces*. Selon lui, les parents parasites évitent ainsi d'investir du temps et de l'énergie dans la construction du nid et l'élevage de leurs petits, ce qui leur permet de se consacrer à la recherche de nourriture et à la conception d'une progéniture plus nombreuse.

Pour les parents adoptifs, qui s'efforcent de s'occuper d'un oiseau avec lequel ils n'ont aucun lien de parenté, le parasitisme représente un coût énorme. De fait, la sélection >

L'ESSENTIEL

> Certains oiseaux pondent dans le nid d'autres oiseaux, qui couvent les œufs parasites puis nourrissent les oisillons.

> Le conflit ainsi créé entre l'oiseau parasite et l'oiseau hôte a favorisé chez les deux protagonistes l'apparition d'une série d'adaptations et de contre-adaptations.

> Par le passé, on pensait que cette coévolution entre le parasite et l'hôte se limitait au stade de l'œuf.

> La coévolution s'est révélée plus complexe et s'étend en fait à toutes les phases du cycle de reproduction.

LES AUTEURS

FRANCISCO RUIZ-RAYA
chercheur postdoctorant à l'université de Vigo, en Espagne

MANUEL SOLER
professeur au département de zoologie de l'université de Grenade, en Espagne

Un jeune coucou gris *(Cuculus canorus)* nourri par la rousserolle verderolle *(Acrocephalus palustris)*, l'une de ses espèces hôtes vivant dans les forêts européennes. Comment le coucou s'y prend-il pour que la rousserolle s'occupe de lui ?

> naturelle a favorisé chez eux l'apparition d'attitudes défensives visant à empêcher ce parasitisme, ce qui entraîne à son tour, chez ces fameux parasites, le développement de stratégies étonnamment raffinées pour contrecarrer ces défenses. Tout comme les grandes puissances impliquées dans la guerre froide, les deux parties en présence se trouvent engagées dans une course aux armements au cours de laquelle elles rivalisent d'ingéniosité en matière de stratégies et d'efficacité, fournissant ainsi certains des meilleurs exemples de coévolution (transformations réciproques se produisant au cours de l'évolution chez des espèces en interaction) ayant été décrits jusqu'ici.

Depuis des siècles, les naturalistes sont fascinés par le comportement reproductif des parasites de couvée. À la suite de Darwin, de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'étude des pressions sélectives qui régissent l'interaction des parasites de couvée avec leurs hôtes. Aujourd'hui, nous savons que le parasitisme de couvée a évolué en sept occasions de manière indépendante chez les oiseaux: trois fois chez les coucous (famille des cuculidés), et une fois chez les ictéridés, famille d'oiseaux comprenant les carouges et les quiscales d'Amérique, chez les pinsons parasites (famille des viduidés), chez les indicateurs (famille des indicatoridés), et chez une espèce d'anatidés, l'hétéronette à tête noire (*Heteronetta atricapilla*).

UNE CENTAINE D'ESPÈCES

En dépit de ses avantages apparents, le parasitisme n'est pas très fréquent chez les oiseaux. Au total, un peu plus d'une centaine d'espèces sont connues pour le pratiquer, c'est-à-dire seulement 1% des espèces actuelles d'oiseaux. Si ce nombre est peu élevé, c'est parce qu'être un parasite de couvée n'est pas une mince affaire. D'une part, le parasite doit surmonter des défis majeurs en termes d'évolution, par exemple faire en sorte que ses petits apprennent à reconnaître les individus de leur propre espèce même quand ils ont été élevés par des individus d'une autre. D'autre part, ils doivent faire face aux stratégies défensives développées par les hôtes pour se débarrasser d'eux.

Au cours du XX^{e} siècle, notre vision de cette course aux armements se fondait sur les découvertes réalisées chez le coucou gris, auxquelles se sont ajoutées des études précises sur le comportement parasitaire du vacher à tête brune (*Molothrus ater*), un oiseau grégaire d'Amérique du Nord. Bien que le coucou soit toujours l'espèce la plus étudiée, les recherches effectuées au cours des vingt dernières années, dont celles de notre équipe, ont montré que les relations coévolutives entre les parasites de couvée et leurs hôtes sont beaucoup plus variées et complexes qu'on ne le pensait. Elles ont également révélé que la course aux armements ne se limite pas au stade de l'œuf, mais intervient dans toutes les phases du cycle de reproduction. Les récentes et nombreuses avancées relatives à la connaissance du parasitisme de couvée chez les oiseaux ont un impact considérable sur notre compréhension générale de la coévolution parasites-hôtes.

PONTE ET ANTIPONTE

Le succès reproducteur des parasites de couvée dépend en grande partie de leur efficacité au moment de déposer les œufs dans un nid étranger, sachant que la première ligne de défense d'un hôte consistera à éviter une telle action. Pour l'hôte, la probabilité de réussir sera d'autant plus importante que le nid sera discret et difficile d'accès pour les parasites, et situé loin de leur perchoir habituel. Chez certains parasites de couvée du genre *Molothrus*, les zones du cerveau en charge du traitement des informations spatiales, notamment l'hippocampe, sont bien développées, ce qui facilite sans doute chez ces espèces la localisation des nids de leurs hôtes. Ces adaptations sont particulièrement évidentes chez les femelles, comme l'ont montré en 2014 et 2016 Mélanie Guigueno, de l'université McGill, au Canada, et ses collègues dans leurs études portant sur la mémoire spatiale et l'hippocampe du vacher à tête brune en Amérique du Nord.

Dans d'autres cas, les hôtes modifient la phénologie de la reproduction afin d'éviter qu'elle ne se superpose à celle du parasite. En Australie, des femelles d'acanthizes à croupion jaune (*Acanthiza chrysorrhoa*), principaux hôtes du coucou éclatant (*Chrysococcyx lucidus*), avancent le début de la ponte et coiffent ainsi sur le poteau les coucous qui n'ont pas encore commencé la leur. En réponse, certains parasites ont développé une stratégie connue sous le nom d'« élevage d'hôtes » (*host farming* en anglais) : lorsque les œufs se trouvent dans un état d'incubation trop avancé pour parasiter le nid, ils le saccagent. Ce qui oblige l'hôte à pondre de nouveau, permettant alors au parasite de déposer son œuf dans le nid.

La stratégie la plus répandue pour prévenir le parasitisme, et peut-être la plus efficace, est la défense active du nid. Certaines espèces

à lire

THEMA
L'intelligence animale

Une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* ou *Cerveau & Psycho* sur les prouesses cognitives des animaux.

Hors-série numérique en vente sur notre site uniquement :
boutique.pourlascience.fr

Page précédente: © Oldřich Mikulica

Les différents oiseaux hôtes de deux coucous africains ont réagi au parasitisme en pondant des œufs ayant des caractéristiques distinctives. Il est ainsi difficile pour les parasites de pondre des œufs de même aspect et cela permet à l'hôte d'identifier les œufs étrangers. La diversité des couleurs et des marbrures est évidente non seulement d'une espèce hôte à l'autre *(colonnes)*, mais aussi d'une femelle à l'autre au sein d'une même espèce *(éléments de la colonne)*.

réagissent avec agressivité lorsqu'elles découvrent un parasite de couvée près de leur nid. Elles le harcèlent et tentent de l'attaquer pour l'expulser des lieux. Souvent, les couples qui vivent dans le voisinage s'unissent et coopèrent pour mener ces attaques, et utilisent même des informations sociales pour adapter leur réponse, comme l'ont démontré les études menées par Daniela Campobello, de l'université de Palerme, et Spencer Sealy, de l'université du Manitoba, en 2010 et 2011.

Dans une étude publiée en 2009, Nicholas Davies et Justin Welbergen, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, ont montré que les rousserolles effarvattes (*Acrocephalus scirpaceus*) étaient plus agressives envers le coucou gris après avoir observé que d'autres rousserolles déployaient près d'elles des stratégies de défense contre l'intrus. En réponse, les parasites tentent de ne pas être repérés. Ils adoptent des comportements furtifs quand ils sont à proximité du nid qu'ils ont l'intention de parasiter ou restent postés sur leur perchoir en attendant le moment propice. Lorsque l'occasion se présente, quelques secondes leur suffisent pour pondre dans le nid de l'hôte.

L'oiseau parasite présente parfois des adaptations morphologiques surprenantes. Ainsi, le coucou gris a un plumage rayé caractéristique sur la zone ventrale, très semblable à celui de l'épervier d'Europe (*Accipiter nisus*), l'un des prédateurs des espèces hôtes du coucou. Quel avantage cela lui apporte-t-il? Afin de répondre à cette question, Justin Welbergen et Nicholas Davies ont effectué en 2008 une étude expérimentale en utilisant différents modèles de coucous empaillés après avoir modifié la couleur de leur plumage ventral. Puis ils les ont placés à proximité de nids de rousserolles effarvattes et ont observé leur réaction. Ils ont constaté que les rousserolles réduisaient le nombre de leurs attaques contre les coucous empaillés dont la partie ventrale était similaire à celle de l'épervier. Cela suggère que le plumage ventral du coucou agit comme un «déguisement» de prédateur.

QUAND LE MÂLE FAIT DIVERSION

Dans d'autres systèmes, le succès du parasitisme repose sur la coopération entre les sexes, ce qui a été observé chez le coucou geai (*Clamator glandarius*), qui est, avec le coucou gris, l'une des deux espèces parasites d'Europe. Comme l'ont décrit en 1974 Fernando Álvarez, de la station biologique de Doñana, et Luis Arias de Reyna, de l'université de Cordoue, en Espagne, le mâle et la femelle du coucou geai coopèrent pour parasiter les nids de leur principale espèce hôte, la pie bavarde (*Pica pica*).

Au cours d'une manœuvre de diversion très élaborée, le mâle s'approche du nid de la pie et tente d'attirer son attention afin qu'elle l'attaque et abandonne ainsi son nid durant quelques instants. La femelle coucou, qui s'était préalablement positionnée près du nid, profite alors de l'occasion pour pondre dans le nid de la pie en seulement deux ou trois secondes.

Mais alors, que se passe-t-il si la pie décide malgré tout de rester dans son nid? Le coucou peut alors recourir à des stratégies moins subtiles. Dans une étude que nous avons publiée >

© Eleanor Caves et Claire Spottiswoode

Dans un nid parasité par un coucou gris, les événements se succèdent de la façon suivante. Tout d'abord, l'œuf pondu par le coucou apparaît semblable aux œufs de l'hôte, bien qu'un peu plus gros *(1)*. Peu après l'éclosion *(2)*, le petit du coucou escalade la paroi du nid afin de se débarrasser, un à un, des œufs de l'hôte *(3)*. Une fois seul dans le nid *(4)*, les parents adoptifs en prendront soin de manière exclusive.

> en 2014, nous avons constaté que plus de la moitié des cas de parasitisme se produisent lorsque la pie femelle est dans le nid. En filmant la scène, nous avons montré que le coucou femelle réussit à déposer son œuf dans le nid tout en étant attaquée par la pie.

Un tel comportement a également été documenté chez le vacher luisant (*Molothrus bonariensis*), dont la femelle parvient à parasiter le nid du moqueur plombé (*Mimus saturninus*) malgré la réponse agressive de ce dernier. Bien que, par sa réaction, le moqueur ne parvienne pas à empêcher le parasitisme, il réussit malgré tout à réduire le nombre d'œufs détruits par le vacher luisant, qui profite généralement de la situation pour les briser à coups de bec.

DES ŒUFS TRÈS RESSEMBLANTS

Durant les dernières décennies du siècle passé, on supposait que la relation coévolutive entre les parasites de couvée et leurs hôtes avait lieu surtout par le biais de différentes stratégies de mimétisme au stade de l'œuf, visant à éviter qu'il soit reconnu comme étranger par l'hôte et donc qu'il soit rejeté. Précisons ici que chez les hôtes du coucou et du vacher, on trouve trois méthodes de rejet. La plus commune est l'éjection de l'œuf parasite du nid. Une autre consiste en l'enfouissement partiel ou complet dans le nid de la couvée parasitée, suivi d'une nouvelle couvée pondue dans un nid superposé au précédent. Une troisième méthode, enfin, est l'abandon du nid parasité.

La ressemblance frappante entre les œufs du coucou gris et ceux de ses principaux hôtes européens a fait l'objet d'innombrables études. Face à la reconnaissance et au rejet de l'œuf parasite par l'hôte, le mimétisme des œufs du coucou s'est perfectionné au point que ces œufs sont presque identiques à ceux de ses hôtes, tant au niveau de la couleur que du mouchetage. En Europe, le coucou gris parasite habituellement plus d'une quinzaine d'espèces d'oiseaux. Cela a conduit à l'émergence de différentes lignées de coucous dont les œufs imitent ceux de leur espèce hôte à un niveau impressionnant.

Comment alors les hôtes peuvent-ils reconnaître l'intrus ? L'étude de plusieurs exemples de parasitisme en Afrique et en Asie a fourni des informations très pertinentes sur cette question. Les œufs des hôtes de certains parasites africains présentent des motifs complexes de mouchetage et des nuances de couleur variées qui font office de « signatures personnalisées ». Ces caractéristiques varient entre les femelles d'une même espèce d'hôtes et donnent lieu à un polymorphisme extraordinaire en ce qui concerne l'aspect de leurs œufs.

© Shutterstock.com/Vishnevskiy Vasily (1, 2 et 4) ; © Oldřich Mikulica (3)

Étonnamment, certains parasites ont également contrecarré cette stratégie, comme on a pu le vérifier dans le sud du Sahara avec l'anomalospize parasite (*Anomalospiza imberbis*) et son hôte le plus commun, le prinia modeste (*Prinia subflava*). Claire Spottiswoode et Martin Stevens, de l'université de Cambridge, ont utilisé des modèles de perception visuelle pour analyser les changements d'apparence des œufs de ces deux oiseaux sur une période de quarante ans. Leurs résultats, publiés en 2010, ont révélé que les motifs de mouchetage et la couleur des œufs des deux espèces se sont rapidement diversifiés en seulement quelques décennies, ce qui indique que le parasite et l'hôte suivent chacun de près la trajectoire évolutive de l'autre. De même, certaines espèces hôtes du coucou didric (*Chrysococcyx caprius*), en Zambie, présentent des œufs aux motifs visuels imprévisibles qui rendent difficile une imitation satisfaisante par le parasite.

L'évolution du polymorphisme semble être un phénomène plus répandu qu'on ne le pensait. Canchao Yang, de l'université de Hainan, en Chine, et ses collègues ont examiné ce phénomène en profondeur en ce qui concerne les systèmes asiatiques, comme celui constitué par le coucou gris et son principal hôte en Chine, le paradoxornis à gorge cendrée (*Paradoxornis alphonsianus*). Contrairement à ce qui se passe avec les hôtes européens du coucou gris, ce dernier et le paradoxornis ont développé un polymorphisme au niveau de la couleur de leurs œufs (qui ne sont pas mouchetés) : chez les deux espèces, ils peuvent être blancs, bleus ou, moins fréquemment, bleu ciel.

Dotés de caractéristiques qui les rendent uniques, les systèmes parasites-hôtes chez les oiseaux asiatiques font l'objet de recherches particulièrement prometteuses. Rien qu'en Chine, six genres et dix-sept espèces de coucous ont été documentés, ce qui est extraordinaire. La présence de multiples espèces de parasites dans une même zone offre une occasion exceptionnelle d'étudier les interactions coévolutives. Celles-ci peuvent se révéler très complexes en raison de la compétition entre parasites ciblant les mêmes espèces hôtes ou, du côté des hôtes, de l'évolution de défenses spécifiques à l'encontre de différentes espèces de coucous.

Il y a encore dix ans, on pensait que la réponse instinctive de l'hôte face à la présence d'un œuf étranger dans son nid consistait à l'en rejeter. Or, depuis quelques années, se sont accumulées des preuves que cette reconnaissance de l'œuf ne conduit pas toujours à son élimination. Notre équipe a constaté que la réponse de l'hôte peut varier en fonction de l'intensité du parasitisme subi par sa population.

Ainsi, dans une étude réalisée dans le sud de l'Espagne, nous avons évalué le pourcentage de nids d'agrobate roux (*Cercotrichas galactotes*) où cet oiseau avait éjecté un œuf parasite de coucou que nous avions nous-mêmes introduit à titre expérimental. Nous avons constaté qu'en à peine dix ans, le taux de rejet était passé de 65 % à zéro. Nous attribuons ce phénomène à la disparition du coucou gris dans la région. Nos observations sur les nids d'agrobates ont révélé que de nombreux individus reconnaissaient l'œuf expérimental intrus, mais décidaient de ne pas l'expulser.

REJETER OU NON L'ŒUF ?

Aussi surprenant que cela puisse paraître, la décision d'accepter l'œuf parasite n'est pas forcément une mauvaise stratégie dans certaines circonstances, car son éjection ne se fait pas sans en payer le prix : l'hôte pourrait éliminer l'un de ses œufs par erreur, ou endommager accidentellement une partie de sa couvée. Pour éviter ce type d'incident, des réponses plus souples sont apparues chez l'hôte, qui adapte son attitude défensive au risque réel de parasitisme. En d'autres termes, il ne réagit que s'il a des preuves évidentes qu'un œuf intrus peut se trouver dans son nid, ou que des parasites adultes sont dans les parages.

Nous savons aujourd'hui que le rejet des œufs étrangers est un processus très complexe. Nos recherches sur le merle noir (*Turdus merula*) ont révélé que certaines caractéristiques des œufs qui parasitent son nid peuvent être déterminantes pour la prise de décision. Bien que les reconnaissant comme étrangers, le merle femelle accepte plus fréquemment les œufs expérimentaux légèrement plus lourds ou plus gros, peut-être parce que le prix à payer pour les expulser serait trop élevé. Des recherches récentes suggèrent que les réponses antiparasitaires de la femelle pourraient se >

© Justin Schuetz

L'oisillon parasite du genre *Vidua (à gauche)* ne se contente pas d'imiter les vocalises du petit de son hôte, l'astrild ondulé (*Estrilda astrild*, un passereau africain, *à droite*), pour quémander de la nourriture. Il fait également preuve d'un spectaculaire mimétisme au niveau des taches, motifs et couleurs ornant l'intérieur de la bouche. Ce mimétisme favorise sans doute le nourrissage de l'oisillon parasite par ses parents adoptifs.

> mesurer à l'aune de l'action des hormones impliquées dans les soins parentaux, comme la prolactine, et dans le métabolisme lui-même, comme la corticostérone (associée au stress). Nos données montrent que la présence d'un œuf étranger altère les taux de ces deux hormones chez le merle femelle, ce qui semble déterminer sa réponse face à l'œuf. Sans aucun doute, l'étude future des mécanismes physiologiques qui interviennent dans le comportement défensif des hôtes sera cruciale pour comprendre ces différences comportementales, tant au niveau des individus que des espèces.

	HÔTE	PARASITE
AVANT LA PONTE	Construit des nids cachés	Développe la mémoire spatiale pour localiser les nids
	Défend agressivement le nid	Imite le plumage d'un prédateur (épervier) pour éviter d'être agressé
		Coopère avec l'autre sexe pour distraire l'hôte
	La femelle n'abandonne pas le nid	Imite le plumage d'un prédateur (épervier) pour éviter d'être agressé
		Parasite le nid pendant que la femelle hôte s'y trouve
STADE DE L'ŒUF	Rejet de l'œuf parasite (par éjection, enfouissement de la couvée parasitée ou abandon du nid parasité)	Détruit la ponte de l'hôte (comportement « mafieux »)
		Ses œufs imitent ceux de l'hôte
	Pond des œufs d'aspects divers (polymorphisme)	Imite le polymorphisme des œufs de l'hôte
STADE DE L'OISILLON	La femelle reconnaît le parasite et l'abandonne, ne l'alimente plus ou l'expulse du nid	L'oisillon parasite expulse du nid tous les œufs ou oisillons de l'hôte pour éviter la concurrence
		L'oisillon parasite imite les oisillons de l'hôte (mimétisme visuel et vocal)
STADE DE L'ENVOL	La femelle reconnaît le jeune parasite et ne le nourrit pas	Le jeune oiseau parasite imite les jeunes de l'hôte (mimétisme visuel et vocal)
		Le jeune oiseau change de parents adoptifs

Le parasitisme de couvée a conduit à l'émergence, à tous les stades du cycle biologique, d'une série d'adaptations et de contre-adaptations tant au sein de l'espèce parasite que de l'espèce hôte. De nombreux exemples de comportement décrits dans ce tableau ont été découverts au cours des deux dernières décennies.

L'hôte ne se contente pas de réagir face à l'œuf étranger. Sa réponse peut également être affectée par le comportement des parasites adultes. En 1979, le biologiste israélien Amotz Zahavi a émis l'hypothèse que ces derniers pourraient recourir à un comportement mafieux en exerçant des représailles contre les hôtes ayant rejeté leurs œufs. Ce n'était là qu'une supposition, mais elle fut très critiquée et n'avait pas été vérifiée expérimentalement. À la fin du siècle dernier, notre groupe a entrepris de le faire sur le coucou gris qui parasite le nid de la pie.

Nos recherches ont montré que les coucous détruisaient tous les œufs du nid où la pie avait expulsé l'œuf du parasite. Le succès reproductif de la pie étant ainsi réduit de manière drastique, il était donc plus rentable pour cet oiseau d'accepter l'œuf parasite que de s'en débarrasser, comme nous l'avons observé; c'était là sa seule chance de voir naître sa propre progéniture. Contrairement au coucou gris, l'oisillon du coucou geai n'éjecte pas les œufs et les oisillons hôtes du nid, donc l'hôte peut parfois élever le parasite parmi sa progéniture. À la suite de ces travaux, d'autres biologistes, notamment les Américains Jeffrey Hoover and Scott Robinson, ont également décrit de tels comportements mafieux chez d'autres espèces, comme le vacher à tête brune.

LE PARASITE DÉGUISÉ EN HÔTE

En 2003, Naomi Langmore, de l'université nationale australienne, et ses collègues ont décrit un comportement vraiment fascinant. Le mérion superbe (*Malurus cyaneus*), un passereau australien, avait pu identifier l'oisillon parasite du coucou didric, et l'avait abandonné et laissé mourir de faim dans le nid. Cette découverte contredisait l'idée largement répandue selon laquelle un tel comportement était exclu car il avait un coût très élevé (risque d'abandonner son oisillon si ce comportement est dirigé vers sa progéniture par erreur) et bien peu d'avantages (abandonner le nid avec un coucou oisillon seul ne sauvera pas sa progéniture). En d'autres termes, si le rejet de l'œuf étranger permet de sauver sa propre progéniture, ce n'est pas le cas avec l'oisillon parasite, car celui-ci a déjà préalablement éliminé tous les œufs de l'hôte. Cependant, des études ultérieures, comme celle de Nozomu Sato, Keisuke Ueda et leurs collègues en 2009, ont montré que certaines espèces hôtes appartenant à l'espèce *Gerygone* – des passereaux également – franchissent une étape supplémentaire et réussissent à expulser l'oisillon étranger en le saisissant avec leur propre bec.

À la suite de ces découvertes, ont été apportées de nouvelles preuves de discrimination pratiquée à l'égard d'oisillons parasites par des hôtes, qui cessaient de les nourrir. Parallèlement, de nombreux cas de mimétisme visuel et vocal (cris pour demander à manger) ont été décrits

Investigación y Ciencia

chez les petits parasites : une stratégie visant à ce qu'ils soient confondus avec les petits de l'hôte. Il s'agit là d'un autre exemple de coévolution : le mimétisme des oisillons parasites est l'une des voies pour contrer la capacité de reconnaissance développée par leurs hôtes. En somme, ces conclusions présument que l'identification des oisillons étrangers est beaucoup plus répandue qu'on ne le supposait il y a seulement quinze ans. Aujourd'hui, il est admis que la course aux armements entre le parasite et l'hôte ne se limite pas à la phase de l'œuf, mais s'étend à celle des petits tant qu'ils restent dans le nid.

Et ce n'est pas tout. Certains éléments indiquent que cette rivalité se prolonge jusqu'à la période d'envol des oiseaux, c'est-à-dire lorsqu'ils ont déjà quitté le nid, ce qui était impensable au début de ce siècle. Bien qu'encore peu étudiées, les adaptations et contre-adaptations à ce stade ont été démontrées dans deux cas. Les preuves les plus solides ont été apportées par María Cecilia de Mársico, de l'université de Buenos Aires, et ses collègues, grâce à leurs travaux sur le carouge à ailes baies (*Agelaioides badius*), oiseau hôte de deux espèces du genre *Molothrus* : le vacher criard (*M. rufoaxillaris*), son parasite spécialisé (il ne parasite que lui), et le vacher luisant (*M. bonariensis*), un parasite généraliste (il parasite aussi d'autres oiseaux).

L'équipe de María Cecilia de Mársico a découvert en 2012 que le carouge nourrit les oisillons du parasite spécialisé, qui imitent à la fois l'apparence de ses propres oisillons et leurs cris de demande de nourriture ; en revanche, il refuse de nourrir ceux du parasite généraliste, qui ne font preuve d'aucun mimétisme avec les petits de l'hôte. Cela signifie que les oisillons du vacher criard, contrairement au vacher luisant, ont franchi une étape supplémentaire en termes de mimétisme.

NOURRI MÊME APRÈS L'ENVOL

Le deuxième exemple d'adaptation au stade de l'envol est illustré par le système formé par le coucou (parasite) et la pie (hôte), chez qui notre équipe a fait deux découvertes importantes. Tout d'abord, nous avons constaté que lorsque le petit du parasite ne partage pas le nid avec les petits de la pie (et il s'agit de la situation la plus courante, puisque les oisillons de l'hôte meurent souvent de faim dans le nid en raison de la concurrence créée par le petit parasite, beaucoup plus efficace pour quémander et obtenir de la nourriture), la pie continue de le soigner et de le nourrir même après qu'il a quitté le nid. Toutefois, lorsque le petit parasite est élevé avec les oisillons de la pie, ses parents adoptifs le reconnaissent après son départ du nid et cessent, dès lors, progressivement de le nourrir.

Deuxième découverte : le très jeune coucou abandonné ne meurt pas (comme c'est le cas du vacher luisant quand il cesse d'être nourri par le carouge à ailes baies), mais se consacre à la recherche d'autres pies et parvient à se faire adopter par celles qui n'ont élevé que des petits parasites dans leur nid. Il s'agit du seul cas connu d'oisillons parasites qui, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du nid, développent une adaptation distincte du mimétisme leur permettant d'éviter d'être reconnus par les hôtes.

Si les relations coévolutives entre les parasites de couvée et leurs hôtes se retrouvent bien à toutes les étapes du cycle de reproduction, l'existence de stratégies défensives à un stade donné pourrait faciliter ou entraver l'évolution de ce type de défense au niveau des étapes postérieures. Ainsi, chez les espèces qui ont développé une bonne capacité de reconnaissance des œufs, il semblerait qu'on ne puisse s'attendre à une même capacité en matière de reconnaissance des petits ou des jeunes qui ont pris leur envol. En revanche, si l'hôte n'a développé de défenses totalement efficaces à aucun de ces stades, cela pourrait favoriser chez lui l'évolution de défenses à n'importe quelle étape du cycle de reproduction.

Les futures recherches apporteront certainement de nouvelles informations sur la relation coévolutive qui s'établit entre les parasites de couvée et leurs hôtes. Les chercheurs se sont lancé de nombreux défis, parmi lesquels celui d'analyser plus en profondeur cette course aux armements, au-delà de la phase d'incubation, et de comprendre le rôle que joue la physiologie dans la régulation des stratégies parasitaires et des défenses de l'hôte.

Enfin, soulignons que les coévolutions entre les parasites de couvée et les hôtes font preuve d'un étonnant parallélisme, non seulement entre des oiseaux très distants les uns des autres sur le plan phylogénétique (comme *Clamator* et *Molothrus*), mais aussi entre des groupes taxonomiques aussi éloignés que les oiseaux, les poissons et les insectes. Aussi, une grande partie des conclusions auxquelles conduisent les recherches sur les oiseaux sont extensibles à d'autres systèmes hôte-parasite. ■

Un jeune coucou geai *(Clamator glandarius, à gauche)* est nourri par sa principale espèce hôte, la pie bavarde *(Pica pica, à droite)*. Le petit du parasite est nourri par l'hôte même après avoir quitté le nid, bien que le parasite et l'hôte ne se ressemblent pas.

BIBLIOGRAPHIE

M. Soler, **Avian Brood Parasitism. Behaviour, ecology, evolution and coevolution,** Springer, 2017.

M. Soler, **Long-term coevolution between avian brood parasites and their hosts,** *Biological Reviews*, vol. 89(3), pp. 688-704, 2013.

W. E. Feeney *et al.*, **The frontline of avian brood parasite-host coevolution,** *Animal Behaviour*, vol. 84(1), pp. 3-12, 2012.

R. M. Kilner et N. E. Langmore, **Cuckoos versus hosts in insects and birds : adaptations, counter adaptations and outcomes,** *Biological Reviews*, vol. 86(4), pp. 836-852, 2011.

N. B. Davies, **Cuckoos, Cowbirds and Other Cheats,** T & AD Poyser, 2000 (réimp. 2011).

© Jesús Porras

L'ESSENTIEL

> Depuis fin 2020, la France a autorisé l'utilisation du cannabis pour le traitement de douleurs intenses, dans le cas de diverses pathologies graves.

> C'est surtout le THC, la molécule la plus active de la plante, qui est utile en thérapie. Les récepteurs cannabinoïdes sur lesquels le THC se fixe existent dans le cerveau et la moelle épinière, notamment le long du circuit de la douleur.

> Les effets du THC se couplent à ceux de la morphine, de sorte que le cannabis représente certainement un traitement améliorant le bien-être des patients qui souffrent intensément.

L'AUTEUR

BERNARD CALVINO
professeur d'université honoraire en neurophysiologie et ancien membre du conseil scientifique de l'institut UPSA de la douleur

Cannabis : l'antidouleur du futur ?

Depuis octobre 2020, un décret français autorise enfin l'utilisation du cannabis à des fins thérapeutiques. Reste à bien comprendre comment il exerce son action antalgique et anti-inflammatoire pour l'utiliser de la façon la plus efficace, notamment en combinaison avec la morphine.

On y est : le 9 octobre 2020, le ministère de la Santé a enfin publié le décret autorisant l'usage du cannabis à des fins thérapeutiques, strictement contrôlées et limitées. Après une trentaine de pays dans le monde, dont les Pays-Bas, l'Allemagne, l'Angleterre et l'Espagne, la France va permettre à des milliers de patients souffrant de maladies graves de tester le cannabis ; l'expérimentation débutera en 2021 auprès de 3000 personnes présentant des douleurs insoutenables non atténuées par les traitements classiques. C'est le cas notamment dans certaines formes d'épilepsie, dans les douleurs chroniques dites « neuropathiques », dans les cancers et les effets secondaires des chimiothérapies, et chez les sujets séropositifs ou atteints de sclérose en plaques.

Mais on ne pourra toujours pas fumer du cannabis… Les médicaments – importés, car cultiver et commercialiser du cannabis restent interdits en France – se présenteront sous forme d'huiles, de gélules et de fleurs séchées, contenant des doses contrôlées de THC, ou tétrahydrocannabinol, la principale substance active du cannabis. Mais que sait-on vraiment des effets du cannabis sur notre organisme et notre cerveau ?

421 MOLÉCULES DANS LE CANNABIS

Le cannabis tel qu'on le connaît aujourd'hui, celui que l'on fume, est un mélange de feuilles séchées et de cœurs de fleurs de la plante *Cannabis sativa*, c'est-à-dire une association complexe de multiples molécules biologiquement actives. En effet, sa composition varie autant que celle de n'importe quelle plante en fonction de l'environnement (dont le milieu de culture auquel la plante s'adapte très facilement) et de la souche génétique. On peut ainsi extraire du cannabis jusqu'à 421 composés chimiques, dont 61 sont des cannabinoïdes à proprement parler (pour le chimiste, ce sont des terpènes à 21 atomes de carbone, ainsi que leurs acides carboxyliques et analogues qui n'existent dans aucune autre plante). >

© Shutterstock.com/Lightspring

Nos deux systèmes antidouleur – opioïde et endocannabinoïde – sont couplés

> Le fait de fumer du cannabis, depuis des millénaires, pour le plaisir à des fins récréatives ou, plus récemment, à des fins thérapeutiques, notamment pour le traitement des douleurs, c'est donc inhaler une grande quantité de molécules dont certaines ont une activité pharmacologique sur les cellules et les neurones de notre corps. Avec bien entendu des effets soit néfastes, soit bénéfiques. Voilà pourquoi les médicaments aujourd'hui autorisés contiennent des molécules spécifiques du cannabis, à des concentrations bien définies. Quelles sont ces substances ?

L'intérêt thérapeutique du cannabis provient en grande partie des propriétés, sur le système nerveux central (à savoir le cerveau et la moelle épinière), de sa principale molécule psychoactive, le THC. Mais d'autres molécules, notamment le cannabidiol (ou CBD) et le cannabinol (CBN), sont aussi présentes dans la plante, en plus ou moins grandes quantités selon les souches génétiques, et le sont également dans les médicaments : car non seulement ces substances ont des effets propres sur l'organisme, mais elles peuvent aussi modifier les propriétés du THC.

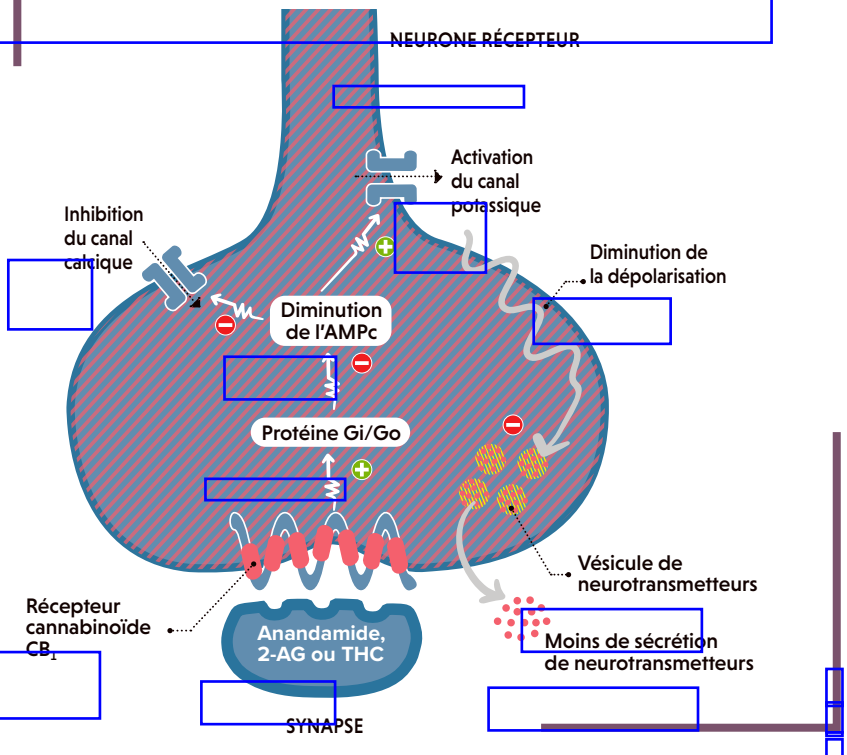
THC, CBD OU CBN ?

Dès 1965, l'équipe de Raphael Mechoulam, à l'université hébraïque de Jérusalem, a isolé le THC à l'état pur, de sorte que l'on a ensuite pu déterminer sa structure, puis ses propriétés pharmacologiques et donc ses effets sur l'organisme. Ainsi, le THC est un psychotrope (à savoir une molécule qui modifie le fonctionnement psychique), un antalgique (ou antidouleur) et un antispasmodique, qui stimule l'appétit, empêche les vomissements et module nos états émotionnels. À fortes doses, il détériore également la mémoire et perturbe les mouvements. Mais ce sont bien ses effets psychotropes et antidouleurs qui intéressent aujourd'hui les médecins et les patients. Quant au CBD, qui n'est pas psychoactif, c'est un anticonvulsivant et un sédatif ; et l'on en sait encore peu sur le CBN, qui serait toutefois dix fois moins psychoactif que le THC.

Pour être utiles en médecine, les traitements doivent donc contenir du THC, le cannabinoïde le plus puissant. Comment agit-il ? Au tournant des années 1990, des scientifiques ont réussi à identifier dans le cerveau une molécule, produite naturellement par notre organisme, sur laquelle se fixe le THC. C'est ce qu'on appelle un récepteur ; il sera nommé récepteur cannabinoïde (CB). Tous les effets du THC sur l'organisme sont dus à sa fixation sur ce récepteur ! En fait, pour les cannabinoïdes, on sait maintenant qu'il existe deux récepteurs endogènes, qui diffèrent légèrement dans leur structure, l'un étant principalement présent dans le cerveau – le CB_1, découvert en 1988 par William Devane et ses collègues à l'université de Saint Louis, aux États-Unis –, l'autre dans le système immunitaire – le CB_2, découvert en 1993 par une équipe autour de

L'EFFET CELLULAIRE DU RÉCEPTEUR CANNABINOÏDE

Le THC et les endocannabinoïdes (comme l'anandamide et le 2-AG) se fixent sur les récepteurs cannabinoïdes, grosses molécules situées à la surface du neurone récepteur, et provoquent ainsi l'activation d'une protéine G particulière dite « Gi/Go » ; celle-ci enclenche une série de réactions intracellulaires qui aboutissent à une diminution de la synthèse d'un messager intracellulaire, l'AMP cyclique. De ce fait, les canaux ioniques calciques sont inhibés et les canaux potassiques sont activés, ce qui engendre une diminution de la dépolarisation et de la propagation de l'influx nerveux dans la membrane du neurone récepteur. En conséquence, ce dernier ne peut plus sécréter ses neurotransmetteurs à la synapse, et la transmission de l'information au neurone voisin est donc bloquée. C'est ainsi que les cannabinoïdes, *via* leurs récepteurs cannabinoïdes, inhibent la propagation des données entre neurones.



© Pour la Science

Sean Munro, au laboratoire de biologie moléculaire du Medical Research Council, à Cambridge, en Angleterre.

À la même période, on a mis en évidence le premier système de contrôle physiologique de la douleur dans le système nerveux central : le système opioïde (également impliqué dans les addictions aux opiacés), où agissent des analgésiques comme la morphine et les enképhalines, de petits peptides que nos neurones eux-mêmes produisent lors d'une douleur intense. Avec la découverte des récepteurs cannabinoïdes, on révélait ainsi l'existence d'un second système antidouleur propre à notre organisme : le système endocannabinoïde. Et, comme nous allons le voir, ces deux systèmes sont couplés, ce qui explique en partie les effets antalgiques du THC.

LES RÉCEPTEURS CANNABINOÏDES

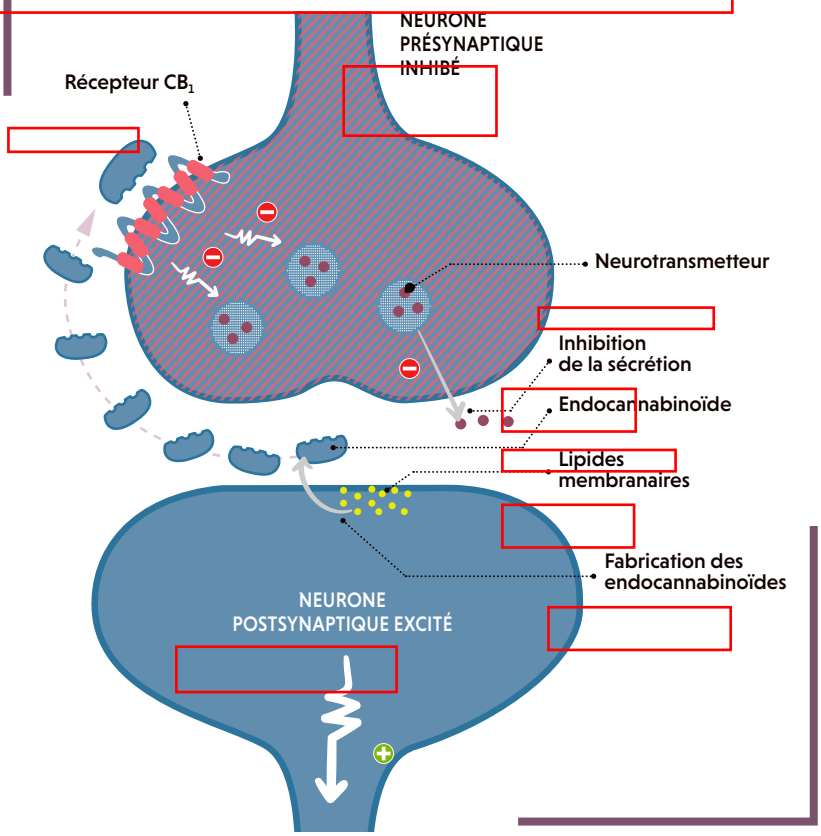
Les deux récepteurs cannabinoïdes, le CB_1 et le CB_2, font partie de la grande famille des récepteurs couplés à une protéine G (RCPG), de grosses molécules insérées dans la membrane des cellules et dont la structure en lacets réalise sept va-et-vient à travers cette membrane, sinuant entre l'intérieur et l'extérieur des cellules. La fixation d'une molécule de cannabinoïde, par exemple le THC, sur son récepteur, comme une clé dans une serrure, déclenche alors une cascade de réactions dans la cellule réceptrice *via* des protéines G particulières, qui appartiennent à une famille de protéines inhibitrices dites « Gi/Go » : elles inhibent la synthèse d'un autre messager intracellulaire, l'AMP cyclique. Il en résulte une diminution de l'activité électrique des neurones récepteurs (*voir l'encadré page ci-contre*).

Dans les années 1990, plusieurs équipes ont par ailleurs identifié des molécules naturellement produites par l'organisme, appelées « ligands endogènes », qui se fixent sur les récepteurs cannabinoïdes à la manière du THC. Il s'agit de deux petits corps gras nommés « endocannabinoïdes » : l'anandamide – nom issu du sanskrit *ananda* signifiant « béatitude » – encore appelé N-arachidonoyl-éthanolamide (AEA), mis au jour en 1992 par William Devane et ses collègues, et le 2-arachidonoyl-glycérol (ou 2-AG), découvert en 1995 par deux équipes indépendantes. Mais l'affinité de ces endocannabinoïdes naturels pour les récepteurs cannabinoïdes est 100 fois plus faible que celle du THC, ce qui suggère que ce dernier s'y lie beaucoup plus facilement et a donc des effets plus puissants sur les neurones récepteurs.

Toutefois, c'est grâce à la découverte de ces ligands naturels des récepteurs cannabinoïdes que l'on a réussi à cartographier dans l'organisme les régions contenant ces récepteurs, donc les structures dont l'activité est susceptible d'être modifiée par le THC…

MODE D'ACTION DES CANNABINOÏDES

Les endocannabinoïdes, l'anandamide et le 2-AG, sont des neurotransmetteurs un peu particuliers… En effet, ils ne sont pas emmagasinés dans des vésicules de stockage à proximité des synapses, mais sont fabriqués localement, après un stimulus douloureux par exemple, à partir des lipides membranaires du neurone postsynaptique excité, puis ils sont libérés aussitôt dans le voisinage de ce neurone et diffusent à très courte distance pour se fixer sur les récepteurs cannabinoïdes CB_1 situés, quant à eux, à la terminaison du neurone présynaptique.
Ainsi, les endocannabinoïdes bloquent, de façon rétrograde, la libération des neurotransmetteurs par ce neurone récepteur présynaptique qui est donc inhibé.



DU « CANNABIS » ENDOGÈNE ET NATUREL

Les endocannabinoïdes ne sont pas des neurotransmetteurs classiques. En se fixant sur leurs récepteurs, ils modifient l'activité du neurone récepteur, mais ils ne sont pas emmagasinés dans des vésicules de stockage à proximité des synapses, comme le sont la plupart des neurotransmetteurs en attendant d'être sécrétés. Les endocannabinoïdes sont fabriqués localement, « à la demande », après un stimulus douloureux par exemple, à partir des lipides membranaires des neurones postsynaptiques excités ; cette synthèse est très rapide, de sorte qu'ils sont libérés aussitôt dans le voisinage de >

© Pour la Science

> ces neurones, ne diffusant qu'à très courte distance de leur lieu de fabrication dans les liquides extracellulaires. Ils ont donc un effet local (*voir l'encadré page 45*).

De plus, la concentration d'anandamide près des synapses dépend de l'activité d'un système de recapture nommé « FLAT » (*FAAH-like anandamide transporter*), capable de jouer le rôle de transporteur pour la réintroduction de l'anandamide dans les neurones. Cela explique les variations importantes de concentration d'anandamide et donc de ses actions, selon les situations et les tissus observés.

Enfin, l'anandamide et le 2-AG ne sont pas des neurotransmetteurs conventionnels dans la mesure où ils « nagent à contrecourant » dans les synapses : alors que les neurotransmetteurs classiques sont libérés à l'extrémité des neurones situés en amont des synapses (les neurones présynaptiques) et se fixent à la surface des neurones situés en aval (les neurones postsynaptiques), l'anandamide et le 2-AG remontent des neurones postsynaptiques vers les présynaptiques, se fixant sur ces derniers. Ce mouvement rétrograde leur permet de bloquer, de manière transitoire ou permanente, mais toujours de façon locale, la libération des autres neurotransmetteurs par ces neurones présynaptiques…

LE CIRCUIT DE LA DOULEUR

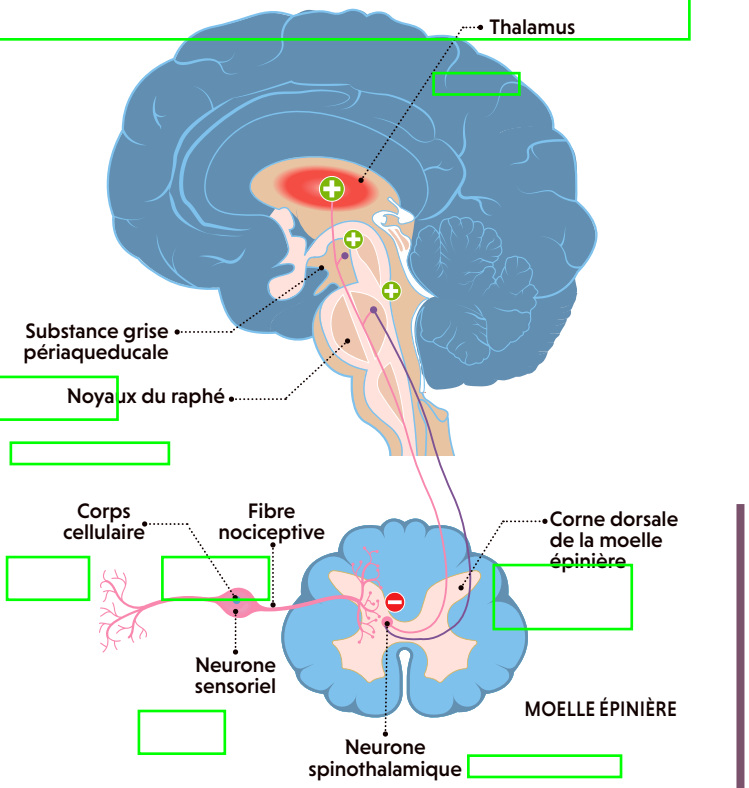
Grâce à ces endocannabinoïdes, on a réussi à établir une cartographie de leurs récepteurs et ainsi montré que les sites d'action des cannabinoïdes, que ce soit le THC ou les endogènes, coïncident bien avec les récepteurs. Ces derniers sont notamment présents dans de nombreuses régions du cerveau et de la moelle épinière intervenant dans la douleur et son contrôle : corne dorsale de la moelle épinière – où se trouvent les terminaisons des fibres nociceptives en provenance de tout l'organisme –, substance grise périaqueducale, noyaux du raphé, noyaux centromédians du thalamus (*voir l'encadré ci-contre*).

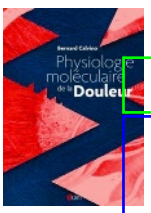
En outre, le récepteur CB_1 est un des récepteurs couplés aux protéines G les plus abondants du cerveau et sa localisation permet de comprendre les effets du THC : il est exprimé en grande quantité dans le cortex cérébral, d'où les effets psychotropes du cannabis ; dans le système limbique, principalement l'amygdale et l'hippocampe, avec des conséquences sur la gestion des émotions et la détérioration de la mémoire ; dans l'hypothalamus, d'où une modulation du comportement alimentaire et une stimulation de l'appétit ; dans les ganglions de la base, ce qui explique les troubles des mouvements ; dans le tronc cérébral, ce qui entraîne une diminution de la douleur et des nausées, et empêche les vomissements ; enfin, dans la moelle épinière, exerçant un effet antidouleur (*voir l'encadré page ci-contre*).

Plusieurs études expérimentales conduites chez les animaux ont confirmé que les cannabinoïdes se fixant sur le récepteur CB_1, qu'ils soient endogènes ou exogènes, interviennent bien dans la modulation de la douleur comme antalgiques, en particulier au niveau de la moelle épinière. Par exemple, en 1998, l'équipe de Howard Fields, à l'université de Californie à San Francisco, a montré que l'injection de ces molécules dans le tronc cérébral de rats diminue les sensations douloureuses *via* l'activation des récepteurs CB_1. Puis, un an plus tard, une autre équipe américaine a observé que dans les ganglions de la racine dorsale, où sont localisés les corps cellulaires des neurones périphériques, les récepteurs CB_1 sont principalement retrouvés dans une sous-population de neurones dont les terminaisons des fibres périphériques sont

LE CIRCUIT DE LA DOULEUR

Notre organisme possède de nombreux neurones sensoriels qui réagissent aux stimuli douloureux. Leur corps cellulaire se trouve dans les ganglions de la racine dorsale et leurs fibres nociceptives se projettent sur les neurones dits « spinothalamiques » de la corne dorsale de la moelle épinière. De là, l'information douloureuse est transmise aux noyaux latéraux et centromédians du thalamus, où la douleur est analysée et perçue. Mais des branches des neurones spinothalamiques se projettent aussi dans les noyaux du raphé et la substance grise périaqueducale, et cette dernière active directement les noyaux du raphé, d'où sont issues les voies inhibitrices de la douleur qui descendent dans la moelle épinière en inhibant les neurones spinothalamiques. Avec pour conséquence, une modulation de la douleur.





À LIRE

Bernard Calvino a récemment publié Physiologie moléculaire de la douleur, Doin, 2019.

© Shutterstock.com/Vinichenko Ihor/© Pour la Science

situées dans la corne dorsale de la moelle épinière et communiquent avec les neurones qui transmettent l'information douloureuse vers le cerveau. En 2007, Nitin Agarwal, à l'université de Heidelberg, en Allemagne, et ses collaborateurs sont allés encore plus loin. En bloquant spécifiquement l'expression des récepteurs CB1 dans le système nerveux périphérique de souris, ils ont prouvé que les cannabinoïdes produisent une analgésie par l'intermédiaire des récepteurs CB_1 localisés dans les fibres périphériques nociceptives dans une proportion beaucoup plus grande que *via* les récepteurs CB_1 exprimés par les neurones du système nerveux central. Par ailleurs, en 2002, une équipe sino-japonaise a montré que l'anandamide inhibe la libération d'un neuromodulateur associé à la transmission des informations douloureuses, le glutamate, dans la corne dorsale de rats, et ce *via* l'activation du récepteur CB1. C'est depuis ces travaux que l'on pense que l'activation du récepteur CB_1 présynaptique par l'anandamide, synthétisé et libéré par l'activation des neurones nociceptifs spinaux postsynaptiques, inhibe, par un mécanisme rétrograde, la neurosécrétion des messagers chimiques à l'origine de la transmission de l'information douloureuse.

LE CANNABIS, UN ALLIÉ DE LA MORPHINE !

Curieusement, la distribution des récepteurs CB_1 est très similaire à celle des récepteurs opioïdes dans le système nerveux central. D'où de possibles interactions opioïdes-cannabinoïdes dans la modulation de leurs effets physiologiques. Par exemple, certaines études, encore controversées, en ont mis en évidence dans les processus de récompense et d'addiction. Mais c'est surtout dans le circuit de la douleur que ces interactions existent. En effet, les deux familles de molécules, cannabinoïdes et opioïdes, ont une activité antalgique *via* leur liaison à un récepteur couplé à des protéines G inhibitrices, ce qui bloque, « doublement » pour ainsi dire, la libération des neurotransmetteurs des fibres nociceptives dans la corne dorsale de la moelle épinière.

Ainsi, des études déjà assez anciennes ont montré, chez les rats, que les effets antidouleurs de la morphine, un opioïde exogène, sont exacerbés par des extraits bruts de cannabis, de même que par l'ajout de THC. Des travaux publiés en 2019 ont confirmé indirectement ce résultat : l'injection, dans les ventricules cérébraux de souris, de différents cannabinoïdes amplifie l'effet antalgique de la morphine.

Comment ? Depuis quelques années, on sait que le THC augmente également la libération d'enképhalines (les opioïdes endogènes évoqués plus haut). De plus, les bloquants des récepteurs opioïdes, auxquels se lient les enképhalines, diminuent l'analgésie produite par le

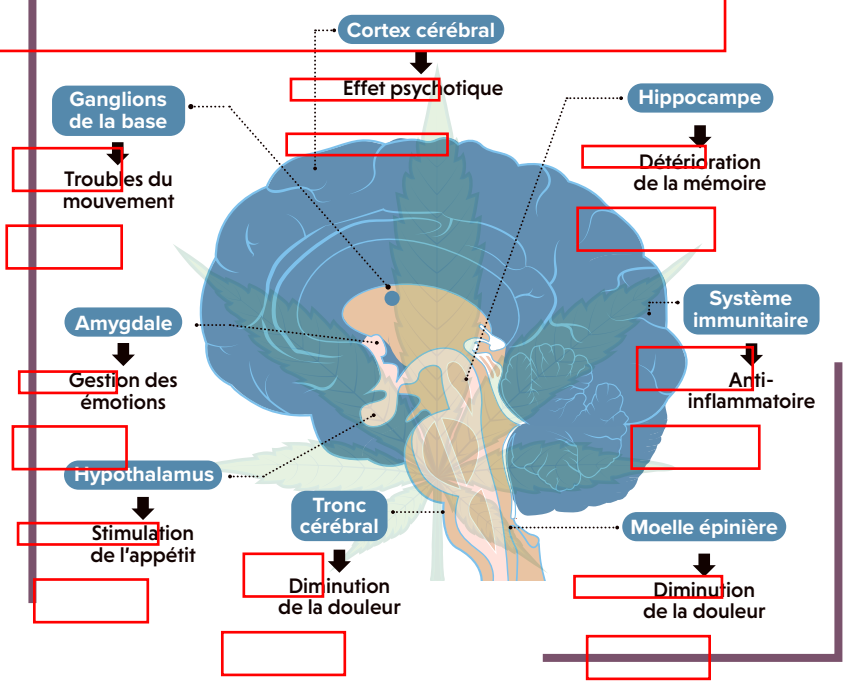
Prescrire des cannabinoïdes à faibles doses augmenterait l'action des opioïdes

THC. En d'autres termes, l'effet antidouleur du THC passe par la sécrétion d'enképhalines. Ainsi, il est envisageable de prescrire des cannabinoïdes à de faibles doses, dépourvues d'effets secondaires, qui augmenteraient l'action des opioïdes utilisés classiquement en médecine, comme la morphine, ce qui permettrait d'éviter « l'escalade des opioïdes » consécutive aux problèmes de tolérance (le fait qu'il faut consommer davantage de morphine pour obtenir des effets antidouleurs équivalents).

En d'autres termes, la morphine serait plus efficace, de surcroît à plus faible dose, si on l'associait à des cannabinoïdes, eux aussi prescrits >

OÙ ET COMMENT LE THC AGIT

Le THC se fixe sur ses récepteurs dans diverses régions du système nerveux central et sur les cellules du système immunitaire, ce qui explique ses effets sur notre psychisme et notre organisme.



© Shutterstock.com/Vinichenko Ihor/© Pour la Science

> en faible quantité. Mais cette pratique, si elle se développe, devra toutefois prendre en compte les populations à risque que représentent notamment les consommateurs réguliers de cannabis, susceptibles d'être pris en charge pour le traitement de douleurs. En effet, du fait de la synergie entre les deux systèmes, opioïde et cannabinoïde, il est nécessaire de leur prescrire des doses plus élevées de morphine pour obtenir un effet antalgique, leurs récepteurs cannabinoïdes étant saturés, voire désensibilisés.

Autre avantage de ce couplage : les systèmes cannabinoïdes et opioïdes jouent également un rôle dans la régulation de l'humeur, les processus de récompense et le développement des addictions. En effet, les deux familles de récepteurs sont aussi exprimées dans tout le circuit cérébral de la récompense qui met notamment en jeu la dopamine, le neurotransmetteur souvent associé au plaisir et aux addictions. Mais l'on ne sait pas encore très bien comment les cannabinoïdes et opioïdes modulent ce circuit de la récompense. Une meilleure compréhension des interactions entre ces deux systèmes devrait permettre de développer de nouvelles stratégies pour le traitement des patients dépendants à diverses substances.

Qu'en est-il du récepteur CB_2 ? Il a été initialement décrit comme un récepteur périphérique, exprimé par les cellules du système immunitaire, notamment les macrophages et les mastocytes, dans lesquelles on trouve tout de même des récepteurs CB_1. Mais pour les défenses immunitaires, ce serait le CB_2 qui jouerait un rôle important : au cours de l'inflammation, des cannabinoïdes endogènes, différents des deux décrits précédemment, sont libérés dans les tissus « enflammés » et réduisent l'hyperalgésie inflammatoire en diminuant l'activation des mastocytes et la libération des médiateurs de l'inflammation (comme la sérotonine et l'histamine).

LE THC EST AUSSI UN ANTI-INFLAMMATOIRE

De même pour le THC. Diverses études scientifiques ont montré que le cannabis jouerait aussi un rôle anti-inflammatoire par son action sur le système immunitaire, *via* les récepteurs CB_2, ce qui représenterait un intérêt clinique important si ces résultats venaient à être confirmés. En particulier, les activités anti-inflammatoires potentielles des cannabinoïdes, associées au fait que ces molécules inhibent aussi la motilité et la sécrétion intestinales, suggèrent leur utilisation dans le traitement des maladies inflammatoires chroniques du tube digestif, comme la maladie de Crohn ou les colites ulcératives.

Par ailleurs, dans les années 2000, plusieurs travaux ont mis en évidence une expression faible mais significative du récepteur CB_2 dans certaines structures cérébrales, comme le striatum, l'hippocampe, le thalamus et l'aire tegmentale ventrale. Peu de données sont disponibles concernant la possibilité d'une fonction centrale des récepteurs CB_2, mais certaines laissent envisager un rôle positif dans les addictions, en particulier dans les effets associés à la cocaïne, la nicotine et l'alcool (l'éthanol).

Enfin, une nouvelle voie de recherche s'est ouverte à la fin des années 2000 avec la découverte que les endocannabinoïdes, comme l'anandamide, se fixent sur d'autres types de récepteurs, nommés PPARs (*peroxisome proliferator activated receptors*), dont la principale fonction est de stimuler la différenciation cellulaire et le métabolisme lipidique. Par ce biais, l'anandamide intervient à nouveau dans l'inflammation, mais il participerait aussi à la neuroprotection (dans la maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques, l'épilepsie…) et améliorerait la mémorisation, par des mécanismes de plasticité cérébrale, dans lesquels de nouveaux neurones ou de nouvelles connexions neuronales apparaissent.

Les multiples études effectuées avec le cannabis et ses dérivés ne mettent pas toujours en évidence des effets puissants, quel que soit le symptôme étudié, en particulier la douleur, mais plaident fortement en faveur de leur utilisation, car ils améliorent réellement l'état général des patients, leur qualité de vie et leur bien-être, pour diverses pathologies : les douleurs chroniques en premier lieu et divers syndromes chroniques, comme les cancers, les épilepsies, le sida et la sclérose en plaques. Avec le lancement de l'expérimentation française, d'ici quelques mois, nous aurons des retours sur l'utilisation du cannabis thérapeutique dans ces différentes maladies, et nous le validerons, certainement, comme traitement, au moins antidouleur. ■

Les études sur le cannabis et ses dérivés plaident en faveur de leur utilisation thérapeutique

BIBLIOGRAPHIE

S. E. O'Sullivan, **An update on PPAR activation by cannabinoids,** *Brit. J. Pharmacol.*, vol. 173, pp. 1899-1910, 2016.

B. Roques *et al.*, **Inhibiting the breakdown of endogenous opioids and cannabinoids to alleviate pain,** *Nat. Rev. Drug. Discov.*, vol. 11, pp. 292-310, 2012.

D. Cichewicz, **Synergistic interactions between cannabinoid and opioid analgesics,** *Life Sci.*, vol. 74, pp. 1317-1324, 2004.

J. D. Richardson *et al.*, **Cannabinoids reduce hyperalgesia and inflammation via interaction with peripheral CB1 receptors,** *Pain*, vol. 75, pp. 1111-1119, 1998.

I. D. Meng *et al.*, **An analgesia circuit activated by cannabinoids,** *Nature*, vol. 395, pp. 381-383, 1998.

S. Munro *et al.*, **Molecular characterization of a peripheral receptor for cannabinoids,** *Nature*, vol. 365, pp. 61-65, 1993.

R. Mechoulam, **Marihuana chemistry,** *Science*, vol. 168, pp. 1159-1166, 1970.

UN

NE MEURT JAMAIS.

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

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Optimiser la conduite du réseau électrique grâce à l'intelligence artificielle

Comment maintenir une bonne continuité de la distribution d'électricité tout en intégrant les nouvelles productions décentralisées d'énergies renouvelables ? En développant des outils d'intelligence artificielle afin de piloter le réseau de manière plus dynamique.

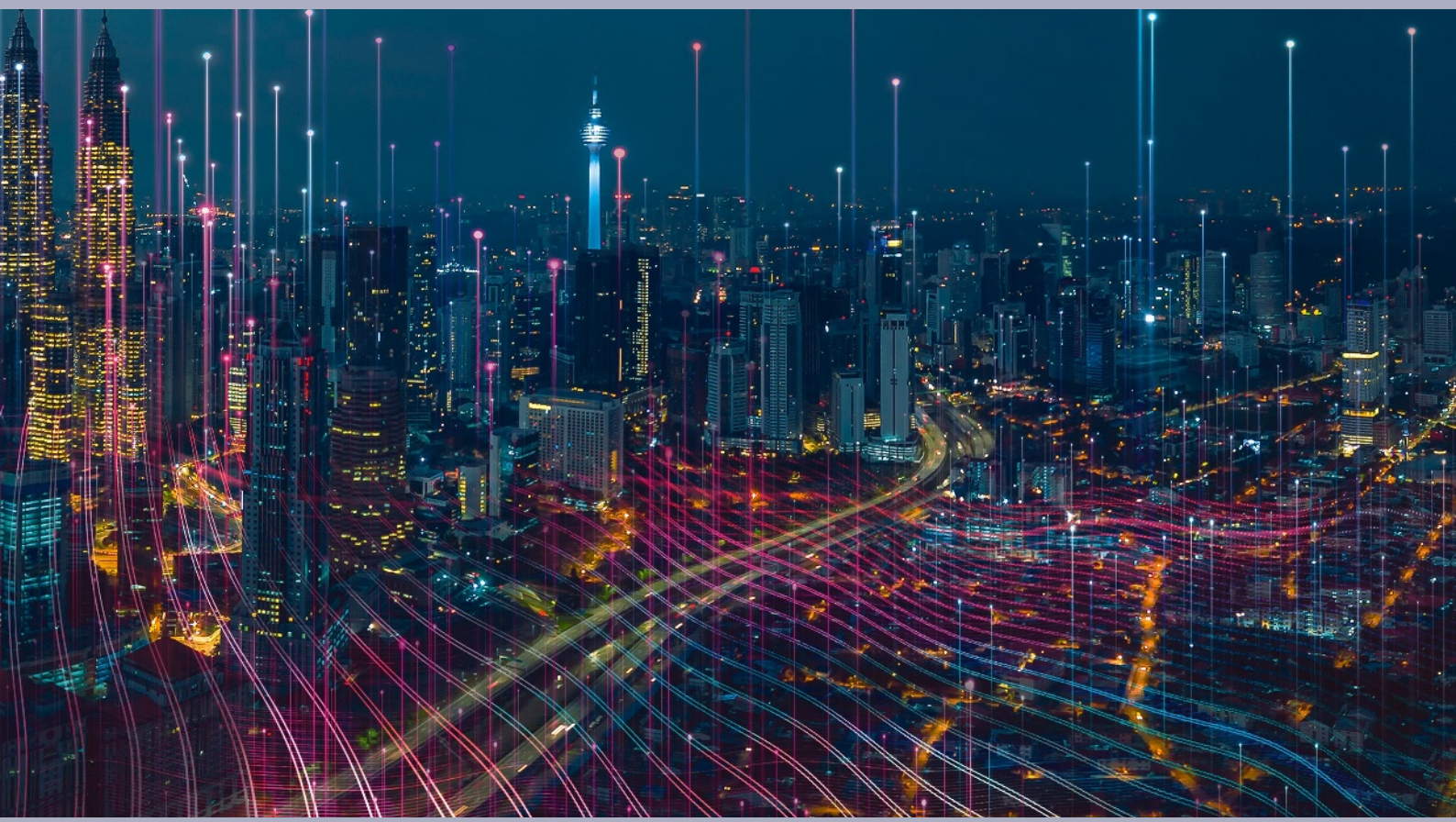
En France, Enedis distribue de l'électricité à 37 millions de clients, repartis sur 95 % du territoire, avec des priorités évidentes: continuité et qualité. Un enjeu pour l'entreprise qui doit faire face aux tempêtes, aux chutes de branches et jusqu'aux câbles souterrains sectionnés lors de travaux... Des incidents aux conséquences d'autant plus importantes s'ils se produisent sur les 650 000 kilomètres du réseau de moyenne tension (HTA), qui desservent davantage de clients que les lignes de basse tension (BT) en aval. En 2019, la durée moyenne d'une coupure non planifiée atteignait 50 minutes environ, sachant qu'un client en subit une tous les quatre ans. Soit un taux de continuité de 99,99 %. *« C'est un bon résultat, d'autant que ces chiffres sont en progression d'année en année,* constate Pierre Mallet, directeur R&D et Innovation chez Enedis. *Il n'empêche que nous cherchons toujours à réduire la fréquence et la durée des coupures. Lorsqu'une panne survient, il faut d'abord la localiser, puis la circonscrire afin de limiter le nombre de clients touchés. Tout cela le plus rapidement possible. L'intelligence artificielle offre des solutions allant de l'autocicatrisation du réseau jusqu'à l'utilisation des énergies d'origine renouvelable afin de limiter l'impact de ces coupures. »*

RÉTABLIR LE COURANT, UNE PRIORITÉ

Pour comprendre comment ces solutions sont mises en œuvre, remontons à l'origine d'une coupure. Les lignes HTA se composent de trois câbles, portant chacun une phase (d'où le « courant triphasé »). *« Si la chute d'une branche fait se toucher deux câbles, alors le potentiel des phases s'égalise et un fort courant dit de "défaut" apparaît dans les conducteurs,* explique Benoît Bouzigon, chef de projets au département Conduite d'Enedis. *Il est repéré par des protections du réseau, des disjoncteurs, qui mettent automatiquement hors tension la zone où le défaut est apparu. Souvent, cela suffit à résoudre le problème. Une branche, par exemple, est retenue par l'arc électrique qu'elle a généré en faisant se toucher les fils. Sitôt que le courant est coupé, elle tombe et les libère. On réalimente alors le réseau. En revanche, si le défaut persiste, le processus d'autocicatrisation se déclenche. »*

De quoi s'agit-il ? D'abord rétablir le courant chez le plus grand nombre de clients, tout en isolant le tronçon endommagé. *« Cette tâche a été entièrement automatisée en trois étapes,* décrit Benoît Bouzigon. *D'abord, il faut estimer la nature du défaut. Vérifier par exemple qu'il ne vient pas d'un transformateur défectueux situé dans un poste source, où le courant haute tension est transformé en moyenne tension. »* Si le défaut est bien situé sur une ligne, une deuxième étape de localisation se lance automatiquement grâce à des détecteurs installés dans les postes sources et en

© Shutterstock.com/jamesteohart



divers points du réseau filaire. Ces détecteurs indiquent seulement si le défaut est en aval ou en amont. Cela suffit toutefois à localiser la panne. « *Un algorithme télécommande alors les interrupteurs et disjoncteurs afin d'isoler ce tronçon*, reprend Benoît Bouzigon. *La troisième étape consiste à remettre le courant sur les tronçons sains. L'ensemble prend moins de trois minutes.* »

C'est alors que le technicien reprend la main. Il analyse la portion en défaut. Actionnant des interrupteurs et disjoncteurs manuellement, il réduit encore la zone hors alimentation et rétablit le courant autour, avant de déclencher l'intervention des équipes pour la réparation sur le terrain.

L'OPTION DU MICROGRID

Pour diminuer encore l'étendue des zones privées de courant, Enedis développe une solution innovante: recourir aux énergies renouvelables (ENR), éoliennes et panneaux solaires. Ces productions sont nécessairement décentralisées. Elles permettent ainsi d'agir de façon « chirurgicale ». Par exemple en alimentant quelques pâtés de maisons en amont ou en aval de la coupure, sans toucher au tronçon endommagé. Mais cela nécessite un réglage précis, car la production doit être à chaque instant adaptée à la consommation, afin d'assurer la stabilité du réseau et sa capacité à fournir une énergie de bonne qualité aux clients finaux.

Pour y parvenir, de nombreux paramètres entrent en jeu: les prévisions de consommation de la zone concernée, les moyens de production, et de stockage. C'est ce que l'on appelle du « microgrid » (microréseau), version miniature et autonome du réseau électrique hexagonal, actuellement en développement au sein de la R&D d'EDF et du G2Elab à Grenoble, sollicités par Enedis. « *Il s'agit de mettre au point un automate local capable de se substituer temporairement au réseau*, résume Dominique Croteau, ingénieur-chercheur au département MIRE (Mesures et Systèmes d'information des Réseaux Électriques). *Pour ce faire, il est nécessaire de recourir à des algorithmes d'intelligence artificielle. La difficulté consiste à identifier lesquels et à les adapter à nos besoins. Mais la problématique se rapproche de celle des pilotes automatiques d'avion ou des voitures autonomes. Nous cherchons donc de ce côté-là…* » Ces travaux, démarrés en 2019, ont permis la mise au point d'un démonstrateur en cours d'évaluation en Corrèze.

Pour limiter l'impact des coupures, l'IA offre des solutions allant de l'autocicatrisation à l'utilisation des énergies renouvelables

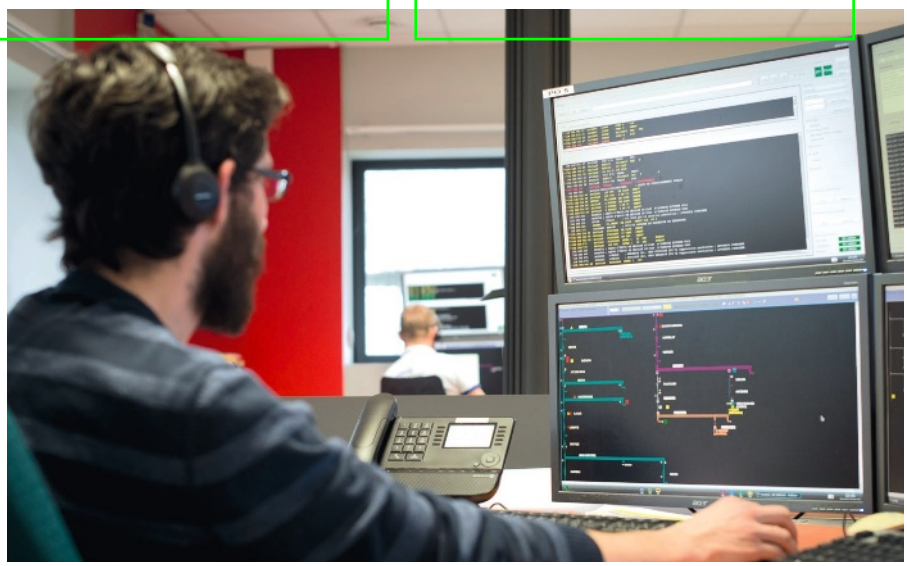
PLANIFIER LES OPÉRATIONS DE MAINTENANCE

La multiplication des productions électriques d'origine renouvelable sollicite les installations et engendre ainsi flux et reflux de puissance sur le réseau. La prévisibilité des transits devient plus difficile, notamment au niveau des départs, ces portions de câbles qui vont du poste source vers les clients. Cela complique la tâche des chargés de conduite qui doivent planifier les opérations de maintenance, depuis l'une des trente agences de conduite réparties sur le territoire. L'intelligence artificielle (IA) pourrait les aider. « *L'idée consiste à l'utiliser afin de prévoir les parties du réseau qui pourraient être en difficulté,*

Automatiser les tâches répétitives pour se concentrer sur les situations qui sortent de l'épure

imagine Benoît Bouzigon. *Pour cela, il faut commencer par identifier quelles sont les "constantes vitales" du réseau (tension, production, consommation, événements météo…). L'intelligence artificielle se chargera ensuite de suivre ces constantes et d'alerter le chargé de conduite si un incident se déclare en certains points du réseau…* »

Dans cet esprit, mais à visée plus large, une thèse a débuté cette année à l'université de Grenoble, financée par Enedis et co-encadrée par Vincent Debusschere, afin d'identifier les besoins des chargés de conduite et proposer des solutions pour les seconder, *via* l'IA. « *Nous allons commencer par observer les tâches qu'ils effectuent et voir concrètement comment on peut les aider*, explique le chercheur. *Nous devons également faire l'inventaire des données du réseau accessibles : mesures de tension, caractéristiques des câbles, des transformateurs, le profil de charge… Il s'agit de faire feu de tout bois car l'intelligence artificielle a besoin de beaucoup d'informations, diverses et sur un temps long, pour être entraînée.* » L'objectif est ensuite de déterminer parmi les différentes techniques d'IA déjà existantes lesquelles sont adaptées à tel ou tel type de tâche. « *Notre objectif est de soulager le plus possible le chargé de conduite*, insiste Vincent Debusschere, *par exemple en automatisant certaines tâches répétitives afin qu'il puisse se concentrer sur les événements les plus graves. Pour l'heure, nous n'en sommes qu'à l'identification des besoins.* »



Une trentaine d'agences de conduite régionales couvrent le territoire *(ici, l'ACR de Mérignac).*

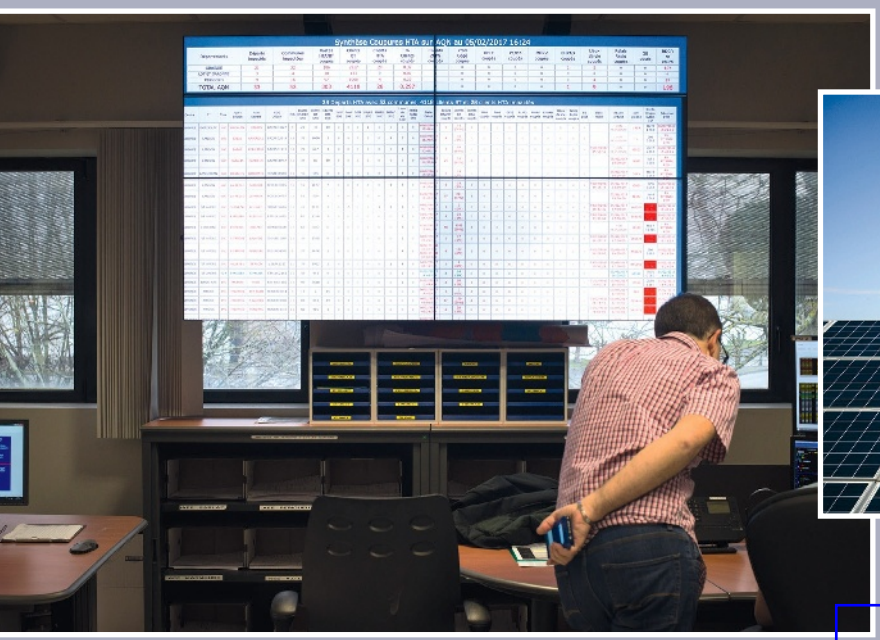
Photos © Goldstein Julien / Agence TOMA, Leroy Anne / Agence PWP

L'apport de ces nouveaux producteurs d'énergies renouvelables dépasse bien entendu le simple cadre d'une alimentation de secours. Selon les intentions gouvernementales, synthétisées dans la programmation pluriannuelle de l'énergie, la part des ENR dans la production élec-trique française doit atteindre 40 % en 2030. Elle est aujourd'hui de 21,1 %. Ce qui représente 370 000 installations, produisant 20 gigawatts au total. « *Bien sûr, il faut avant tout se réjouir de l'arrivée de cette énergie d'origine éolienne ou solaire*, reprend Pierre Mallet. *Mais par définition, leur production, dépendante de la météo, est intermittente. Nous devons donc intégrer ces nouveaux fournisseurs sans perturber le réseau. Un vrai défi ! D'autant plus qu'il nous faut surveiller le coût des solutions à mettre en œuvre, et donc limiter le recours à un développement trop important du réseau. Le maître mot est plutôt l'optimisation du système. L'intelligence artificielle constitue un outil idéal pour y parvenir.* »

GÉRER LES VARIATIONS DE TENSION

Enedis est engagé contractuellement à fournir une tension HTA de 20 000 volts, à 5 % près. Cette tension est obtenue dans les postes sources, *via* des transformateurs, à partir du courant haute tension dont RTE (Réseau de transport d'électricité) a la charge. Il alimente ensuite des départs HTA, qui eux-mêmes irriguent des postes HTA-BT, autrement dit la basse tension que l'on achemine chez les clients. Cependant, la tension dans le réseau varie : elle diminue avec la distance au poste source. Mais elle peut aussi s'accroître si un producteur d'ENR est relié au réseau. Enfin, la consommation varie également tout au long de la journée en fonction de l'activité. Un quartier d'habitations connaîtra un pic de consommation le matin de 7 heures à 9 heures, tandis qu'une zone industrielle s'animera plutôt à partir de 9 heures… Bref, en fonction des lieux qu'il dessert, chaque poste source va appliquer une tension de consigne légèrement différente des 20 000 volts, de telle sorte que la tension effective sur le réseau soit bien comprise dans la fourchette des ± 5 % de tolérance.

« *Cette tension de consigne est fixée une bonne fois pour toutes pour chaque poste source, sauf gros travaux dans la zone*, reprend Benoît Bouzigon. *Elle permet de*



L'apport d'électricité d'origine renouvelable est géré au sein des agences de conduite régionales *(ici celle de Mérignac)*. Le recours à l'intelligence artificielle permettra d'utiliser au mieux cette production par nature variable.

rester dans les clous, mais finalement sans finesse. Surtout, lorsqu'il y a trop de productions d'ENR, nous ne savons plus trouver une tension de consigne applicable toute l'année. D'où l'idée de passer d'une tension de consigne fixe à une tension dynamique, qui s'adapterait plusieurs fois par jour à l'état réel de la consommation et de la production. » Enedis a donc entrepris des actions R&D afin de mettre au point un algorithme capable de réaliser une telle tâche. Pour cela, un élément clé consiste à disposer en temps réel d'une image de la tension sur le réseau.

« *Nous sommes partis d'un algorithme bien connu, un estimateur d'état*, explique Dominique Croteau. *Il a fallu l'adapter, car il est utilisé sur le réseau transport, qui est en boucle, et comporte de nombreux capteurs de tension et de puissance. Du fait de ces boucles, il y a de nombreuses redondances qui permettent à l'estimateur d'être très précis. Davantage même que les capteurs, dont il corrige les erreurs de mesure.* » Il faut en effet bien distinguer le réseau de transport, à très haute tension, qui part des centrales vers les postes sources où se trouvent les transformateurs HTA-HTA, et le réseau distribution qui part de ces postes et va jusqu'au client. Cette configuration est en antenne en quelque sorte, avec un émetteur, le poste source et les récepteurs: les clients. « *Dans ce cas, il n'y a pas de boucles, et donc moins de redondances,* reprend Dominique Croteau. *L'estimateur d'état n'a pas grand-chose à se mettre sous la dent. Notre but était donc de trouver des indicateurs de tension sur le réseau, sans multiplier les capteurs, ce qui coûterait trop cher.* »

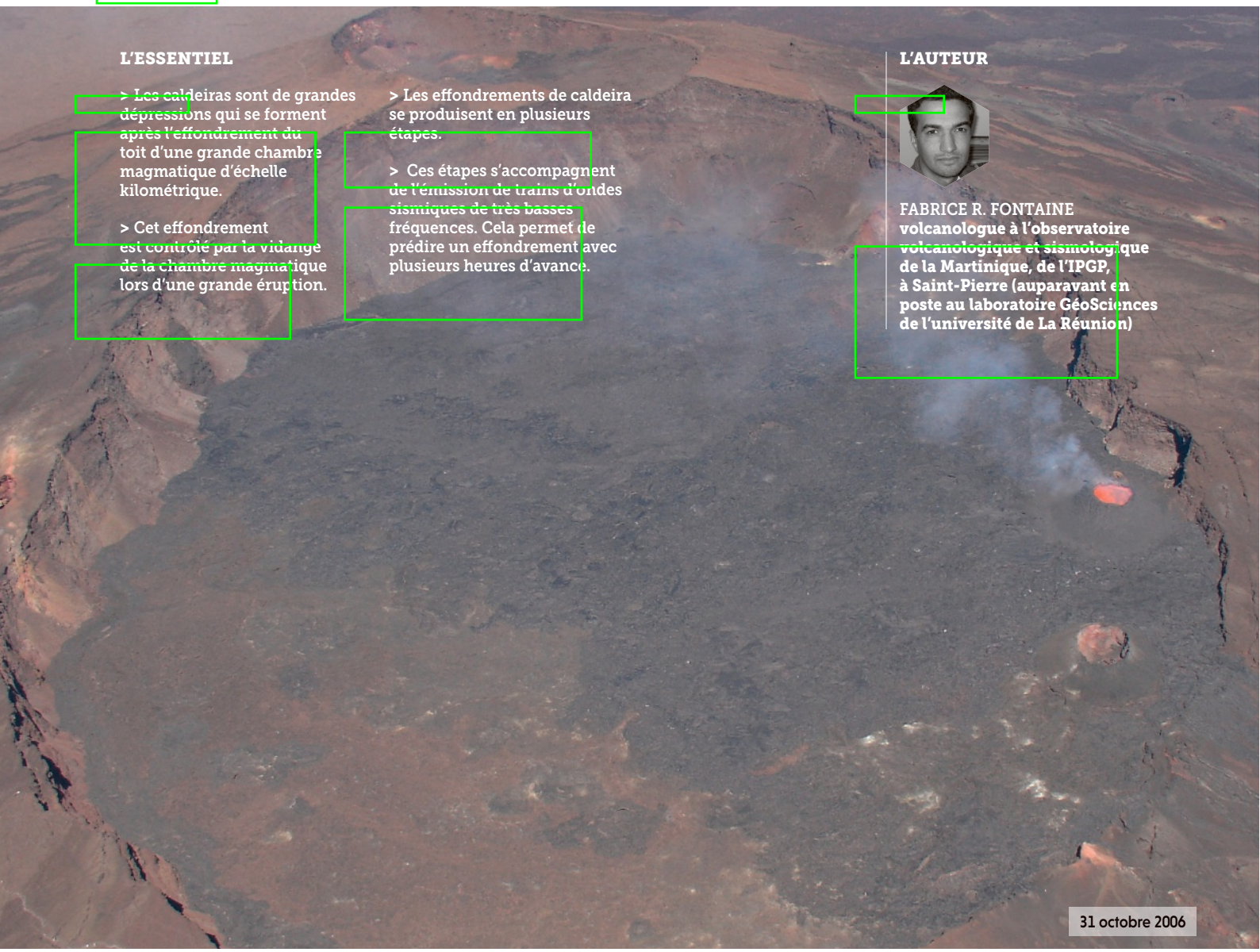
OPTIMISATION DE LA DISTRIBUTION

La solution est venue des fameux postes « HTA-BT ». On en compte près de 800 000 sur tout le territoire. De parfaits « indics », pourvu que l'on sache s'en servir... « *En modélisant la courbe de charge d'un poste HTA-BT tout au long de l'année, nous nous sommes rendu compte que nous obtenions une très bonne estimation de la tension à ce nœud du réseau*, raconte Dominique Croteau. *Chaque poste constitue donc un point de mesure supplémentaire pour nourrir l'estimateur d'état. Nous avons également ajouté des capteurs, en nombres limités. Au final, nous avons un profil de tension en chaque nœud du réseau à 1 % près de la réalité, remis à jour toutes les 10 minutes!* »

Cette image est la clé d'une gestion dynamique du réseau. Sitôt qu'une anomalie en tension est détectée quelque part, par exemple un apport d'énergie dû à des panneaux photovoltaïques, un second algorithme se met en route pour recalculer instantanément la nouvelle tension de consigne à appliquer au poste source. « *Grâce à cette optimisation de la distribution*, reprend Benoît Bouzigon, *nous gérons l'arrivée de nouveaux producteurs d'ENR en limitant le développement du réseau physique. Auparavant, nous pouvions être amenés à créer un départ depuis le poste source vers ce nouveau producteur, de façon à l'isoler du reste du réseau. Ce ne sera plus nécessairement le cas avec cette gestion dynamique ; l'intérêt économique est évident.* »

Deux brevets ont déjà été déposés. La phase de test a commencé, dans deux postes sources situés dans les Pays de la Loire, un autre en Côte d'Azur et un quatrième en cours d'installation en région Bretagne. « *Nous attendrons le retour d'expérience de ces quatre postes avant de décider un déploiement plus large*, conclut Benoît Bouzigon. *Par ailleurs, cette gestion dynamique n'a vocation à être utilisée que sur 10 à 30 % du territoire, là où les ENR sont très présentes.* » Les leçons de ces expérimentations devraient être tirées à la fin de 2021.

La gestion dynamique du réseau permet de gérer l'arrivée des producteurs d'ENR en limitant le besoin d'infrastructures physiques



31 octobre 2006

L'ESSENTIEL

> Les caldeiras sont de grandes dépressions qui se forment après l'effondrement du toit d'une grande chambre magmatique d'échelle kilométrique.

> Cet effondrement est contrôlé par la vidange de la chambre magmatique lors d'une grande éruption.

> Les effondrements de caldeira se produisent en plusieurs étapes.

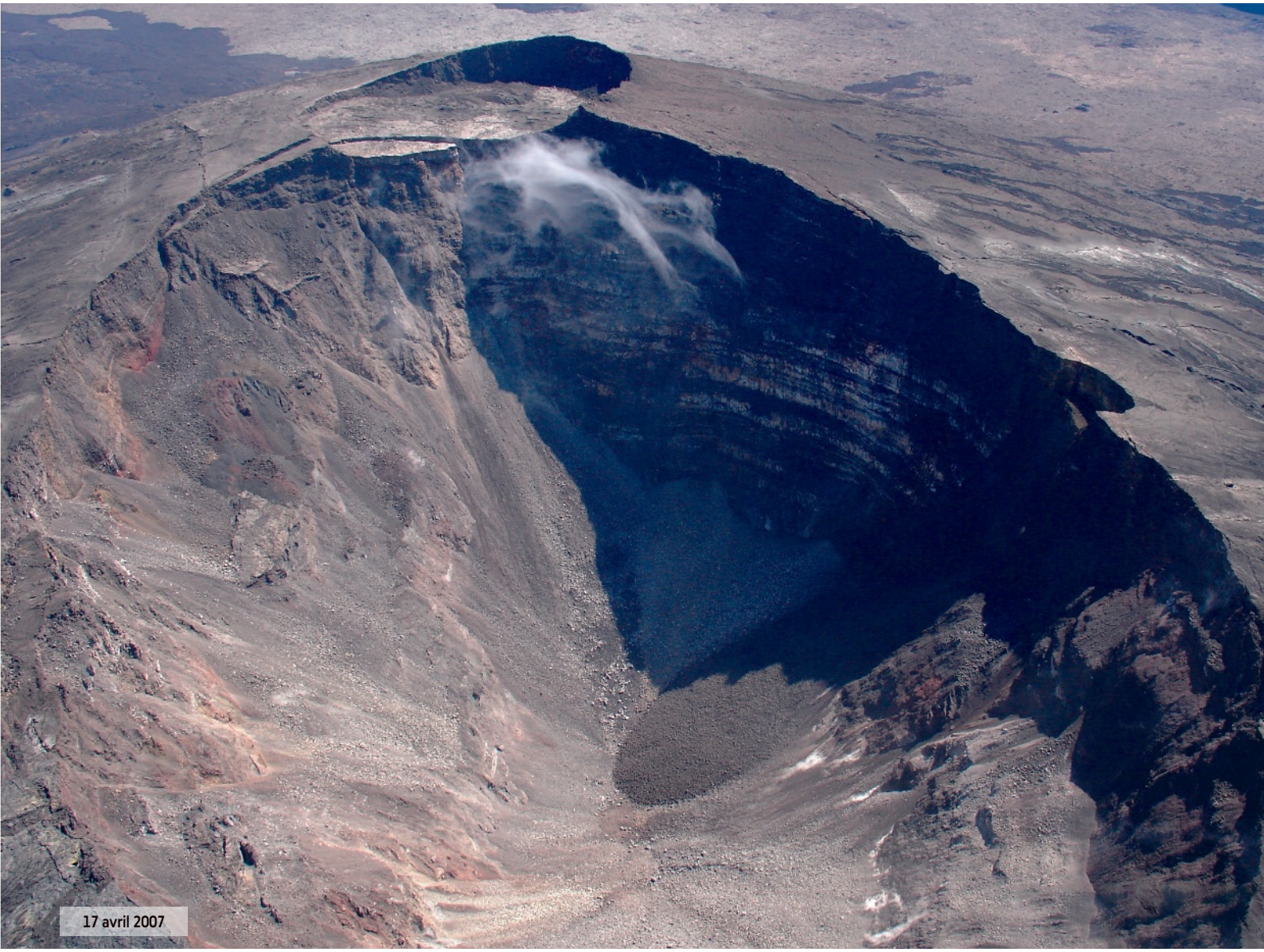
> Ces étapes s'accompagnent de l'émission de trains d'ondes sismiques de très basses fréquences. Cela permet de prédire un effondrement avec plusieurs heures d'avance.

L'AUTEUR

FABRICE R. FONTAINE
volcanologue à l'observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique, de l'IPGP, à Saint-Pierre (auparavant en poste au laboratoire GéoSciences de l'université de La Réunion)

Prédire l'effondrement des cratères volcaniques

Au cours des grandes éruptions, celles qui émettent des kilomètres cubes de matériaux, des ondes de très basses fréquences indiquent l'imminence de la formation d'une grande dépression – une caldeira – assez tôt pour prévenir les populations.



Le cratère du piton de la Fournaise, à La Réunion, le 31 octobre 2006 *(à gauche)* et le 17 avril 2007 *(ci-dessus)* après son premier effondrement. D'autres ont suivi mais n'ont pas beaucoup modifié la structure du cratère.
La partie la plus profonde du cratère se trouve à quelque 340 mètres sous ses bords, soit une profondeur supérieure à la hauteur de la tour Eiffel. Un cratère ou, plus généralement, un édifice volcanique effondrés résultent de l'effondrement d'une chambre magmatique sous-jacente.

© OVPF - IPGP

En ce 6 avril 2007, des passionnés observent l'éruption en cours au piton de la Fournaise, prudemment postés à quelque 7 kilomètres du sommet du volcan. Soudain, à 0 heure 48, le cratère Dolomieu, le plus grand cratère du grand volcan actif de La Réunion, s'effondre en produisant un séisme de magnitude 5. Lorsque le 1er mai, l'éruption terminée, on pourra à nouveau observer la surface du cratère, les Réunionnais apprendront qu'elle est descendue de quelque… 340 mètres !

Les volcanologues utilisent le terme de « caldeiras », issu du portugais *caldeirão*, signifiant « chaudron », pour désigner les grandes dépressions qui se forment lors de ce genre d'effondrements au sein d'un édifice volcanique. Les caldeiras résultent de la vidange d'un vaste réservoir de magma sous-jacent. Or les formations de caldeiras sont parmi les événements les plus menaçants du volcanisme. Ainsi, lorsqu'il y a 640 000 ans l'immense chambre magmatique sous-jacente à ce qui deviendrait le parc américain du Yellowstone, dans le Wyoming, s'est vidangée, elle a émis 1 000 kilomètres cubes de lave et couvert la moitié de l'Amérique du Nord de cendres ! La dépression créée par son effondrement mesurait 45 kilomètres de large pour 85 kilomètres de long…

Plus près de nous, en 79 de notre ère, l'éruption du Vésuve qui a précédé l'effondrement du cratère a fait disparaître les villes de Pompéi, d'Herculanum et de Stabies… et formé, à seulement 10 kilomètres au sud-est de Naples, une caldeira de 2,3 kilomètres de diamètre… Et à une dizaine de kilomètres au nord-ouest de Naples, se trouve un autre immense volcan situé autour et sous le golfe de Pouzzoles : les champs Phlégréens. Lorsqu'il y a 39 000 ans sa chambre magmatique s'est >

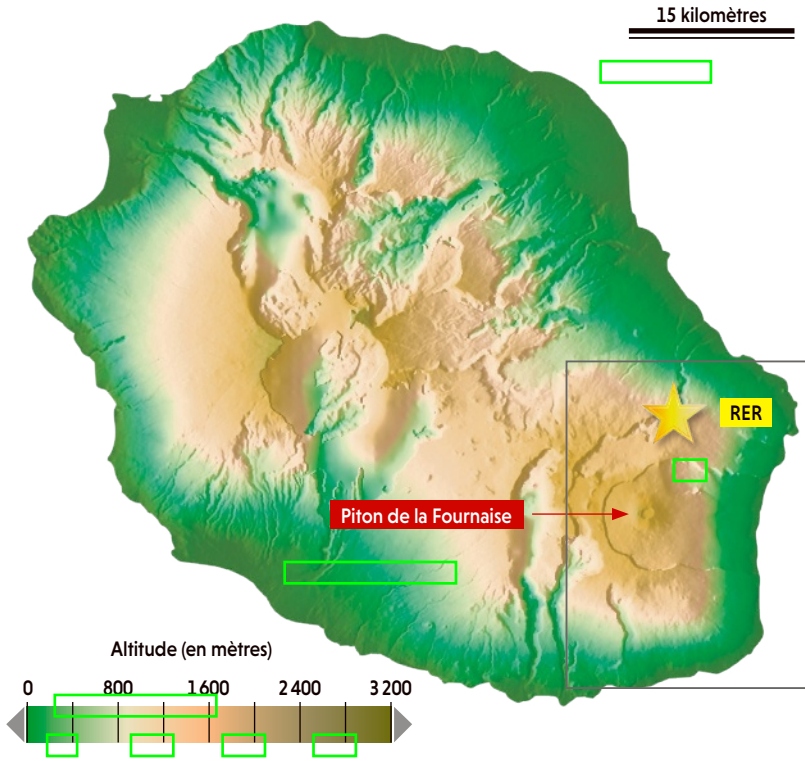
> vidée, elle a émis 150 kilomètres cubes de lave et formé une caldeira de 12,5 kilomètres de diamètre. Qu'arriverait-il à Naples si un tel phénomène se reproduisait à l'avenir, même avec une ampleur moindre?

Si elle est potentiellement très dangereuse, la formation d'une caldeira est heureusement un événement relativement rare à l'échelle de nos vies: en un siècle, seulement sept se sont produits à travers le monde (*voir l'encadré page 58*). C'est pourquoi l'enregistrement seconde par seconde des phases éruptives qui ont précédé et accompagné la formation d'une caldeira au piton de la Fournaise en 2007 est précieux: il nous a révélé le moyen de prédire avec quelques heures d'avance la formation d'une caldeira.

Comment? Grâce aux mesures réalisées à l'observatoire installé à son piémont par l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), qui fait de ce volcan du sud-est de l'île de La Réunion l'un des mieux étudiés du monde (*voir les cartes ci-contre*). Apparu il y a environ 530000 ans, le piton de la Fournaise est dû à l'existence dans la région, depuis 65 millions d'années, d'un panache mantellique, c'est-à-dire d'une vaste remontée de matière chaude à travers le manteau terrestre (les 2885 kilomètres sous-jacents à la croûte terrestre). Avant 2007, les deux cratères de ce volcan formaient deux dépressions sommitales peu profondes: à l'ouest le cratère Bory, qui date de la première moitié du XVIII^{e} siècle, et à l'est le cratère du Dolomieu, formé en 1791. La nouvelle caldeira a beau être modeste, elle n'en est pas moins exceptionnelle, car sa formation a pu être suivie de minute en minute.

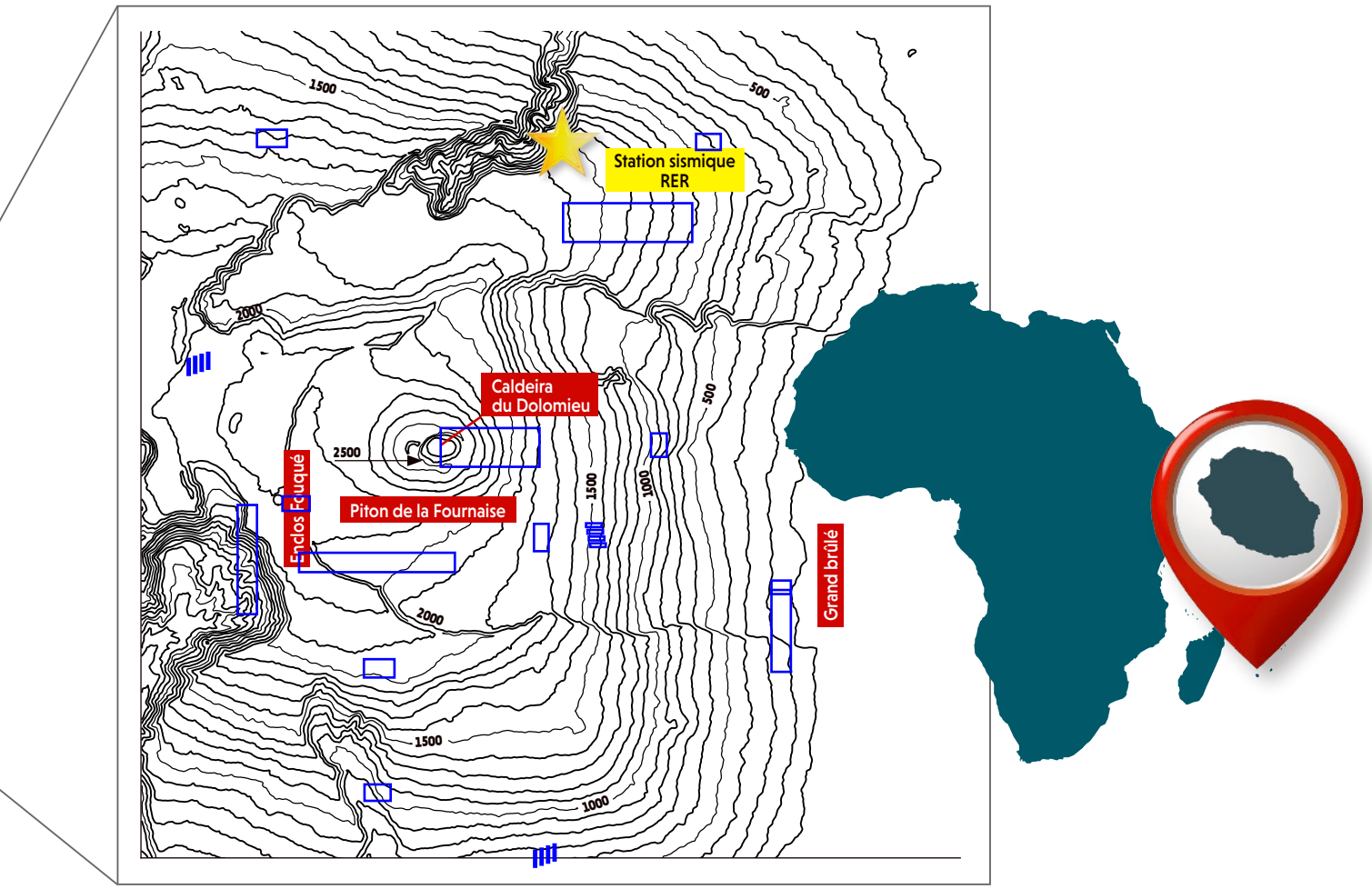
Tout a commencé en 2006, quand, après une activité intense, une éruption a, entre le 30 août et le 31 décembre, tellement rempli le cratère du Dolomieu que celui-ci a débordé par sa bordure inférieure. Cet épisode n'était qu'annonciateur: l'année suivante, des fissures se sont ouvertes, d'abord au sommet, puis sur le flanc sud-est et, enfin, à 7 kilomètres du sommet, à 590 mètres d'altitude au sud-est.

L'une des plus grandes éruptions connues du volcan a alors commencé: elle s'est déroulée en plusieurs épisodes du 18 au 19 février, du 30 au 31 mars et du 2 avril au 1er mai. L'éruption d'avril a produit un volume de laves et d'intrusions – c'est-à-dire d'ouvertures de la roche du volcan par des filons de lave – que l'on estime à 0,24 kilomètre cube. Ce volume apparaît faible si on le compare aux volumes expulsés par d'autres volcans lors de la formation d'autres caldeiras (*voir l'encadré page 58*). Toutefois, la dépression du Dolomieu est assez importante pour que la séquence qui s'est déroulée lors de sa formation puisse être caractéristique de la formation d'une caldeira.



Le piton de la Fournaise se trouve à La Réunion, île française située à quelque 700 kilomètres à l'est de Madagascar. Plusieurs formations de caldeira ont structuré au cours du temps ce grand volcan bouclier culminant à 2632 mètres d'altitude. Ainsi, la caldeira du Dolomieu, qui s'est formée en 2007, se trouve au sein de l'enclos Fouqué, une caldeira de 9 kilomètres de large et de 13 kilomètres de long, bordée de falaises de 100 à 400 mètres de haut. Le piton de la Fournaise est l'un des volcans les mieux surveillés du monde, un observatoire volcanologique étant installé sur l'un de ses flancs.

La vidange de la chambre magmatique entraîne l'affaissement de la colonne de roches de la cheminée du volcan



Pour les volcanologues, cette séquence n'a *a priori* rien de mystérieux : il s'agit d'« un coup de piston ». Le « piston » est constitué par la masse de roches *grosso modo* cylindrique surmontant la grande chambre magmatique sous pression, qui se trouve sous le volcan réunionnais, comme sous tous les grands édifices volcaniques. Les observations accumulées portant sur les sept formations de caldeiras les plus récentes suggèrent que la colonne de roches constituant le « piston » peut mesurer entre 1 et 12 kilomètres.

LE MODÈLE DE L'EFFONDREMENT D'UNE CALDEIRA

Durant une grande éruption, la vidange de la chambre magmatique entraîne l'affaissement de la colonne, lequel induit une résistance de la roche tout autour du « tube » dans lequel se déplace le cylindre de roches ; pour le dire en termes de géophysicien, il se crée une contrainte cisaillante annulaire s'opposant au déplacement du piston. Ces efforts mécaniques se traduisent par un gonflement de l'édifice volcanique tout au long de la faille annulaire bordant la colonne de roches, suivi d'un dégonflement lorsque le piston s'arrête. Un « rebond élastique » se produit ainsi : après s'être déformées pour accommoder la pression latérale exercée par le piston, les roches de l'édifice volcanique reprennent leur forme initiale, démontrant par là que même si elles semblent extrêmement rigides à notre échelle, elles possèdent, à l'échelle du volcan, une certaine élasticité.

Au laboratoire GéoSciences Réunion de l'université de La Réunion et à l'observatoire volcanologique du piton de la Fournaise, nous avons suivi seconde par seconde la mise sous contrainte de l'édifice accompagnée d'un gonflement, puis le relâchement de ces contraintes. Tout cela ne s'est pas produit sans faire de « bruit », en d'autres termes sans l'émission de vibrations. Les descentes du piston ont systématiquement produit le même signal vibratoire caractéristique : des paquets d'ondes sismiques de très longues périodes et ayant sensiblement toujours la même durée.

Les ondes sismiques, rappelons-le, sont des propagations de déformations élastiques de la >

© Fabrice R. Fontaine/Pour la Science

LES EFFONDREMENTS RÉCENTS DE CALDEIRA

Le sommet du Pinatubo, aux Philippines, en train de s'effondrer le 1er août 1991. La formation de la caldeira qui a résulté de cet effondrement a fait perdre beaucoup d'altitude au volcan.

La formation d'une caldeira résulte d'une forte réduction du volume de la chambre magmatique, laquelle s'accompagne d'un effondrement d'une partie de l'édifice volcanique et d'éruptions à fortes émissions de laves ou de cendres. En 1991, par exemple, le Pinatubo en a émis de 3,7 à 5,3 kilomètres cubes ; le Santorin, un volcan de la mer Égée entré en éruption il y a 3 500 ans, a émis 41 kilomètres cubes de matériaux ; etc. Les formations de caldeira sont potentiellement très dangereuses, ce qu'illustre au mieux le cas de la caldeira du parc national de Yellowstone, aux États-Unis, évoqué dans l'article.

Heureusement, de tels événements catastrophiques sont rares à l'échelle géologique. De façon générale, la formation de caldeiras est rare à l'échelle de nos vies : seules sept caldeiras se sont formées au cours des cent dernières années. En 1968, il y a d'abord eu celle de l'île-volcan de Fernandina, aux Galápagos, puis en 1976 celle de l'énorme volcan Tolbachik, au Kamtchatka. De sinistre mémoire, l'effondrement en 1991 du cratère du Pinatubo, aux Philippines, s'est aussi accompagné de la formation d'une profonde dépression *(voir la photographie ci-dessus)*. En 2000, le cratère de l'île-volcan de Miyake-jima s'est aussi effondré, puis en 2007 celui du piton de la Fournaise. En 2014-2015, une dépression s'est formée au cours de l'éruption du volcan islandais Bárðarbunga. Enfin, en 2018, le cratère du Kīlauea, à Hawaii, s'est effondré en formant une dépression. Par chance, tous ces événements sont restés relativement modestes et, hors celui du Pinatubo, se sont produits à distance suffisante des zones peuplées pour ne pas occasionner de victimes.

Pour illustrer ce phénomène par des événements récents, détaillons un peu l'effondrement du Kīlauea, en 2018, et celui de la caldeira de Bárðarbunga, en 2014-2015. Au Kīlauea, le plancher de la caldeira s'est enfoncé d'environ 550 mètres à certains endroits, tandis que le débit de magma atteignait 1700 mètres cubes par seconde. Le lac de lave installé au sommet du volcan a alors disparu et les éruptions de la bouche éruptive du Pu'u 'Ō'ō du Kīlauea se sont interrompues : elles se poursuivaient depuis 1983 ! Le 1er mai et le 4 août 2018, 62 effondrements se sont produits au sommet du volcan, distant de plus de 40 kilomètres de la sortie de lave. La baisse du plancher de la caldeira suggère une émission de lave de 0,825 kilomètre cube, valeur comparable au volume émis par la sortie latérale sur les basses pentes du Kīlauea entre le 3 mai et début août 2018.

Quant à la formation de la caldeira de Bárðarbunga, nous nous en souvenons tous, car elle a perturbé le trafic aérien en Europe pendant les 180 jours qu'a duré l'éruption. Le volcan se trouvant en effet sous un glacier, des explosions magmatophréatiques (lave et eau) se sont produites, ce qui a dispersé de la cendre dans tout le ciel de l'Atlantique nord. Le plancher de cette caldeira s'est abaissé de quelque 65 mètres tandis que la fissure émettant de la lave se trouvait à 48 kilomètres de la dépression. Entre 1,3 et 1,7 kilomètre cube de lave a été émis.

> roche (laquelle tend à reprendre sa forme). Les ondes P (de compression), S (de cisaillement) et de surface, produites par les séismes d'origine tectonique (des glissements brusques de plaques) sont bien connues. Les ondes produites dans le cas qui nous intéresse sont très différentes. Ces paquets d'ondes de très basses fréquences (très longues périodes) et de durées à peu près égales d'une émission à la suivante sont comparables aux trains d'ondes sonores émis lors du glissement saccadé de deux objets l'un contre l'autre (un cylindre de charnière dans son gond par exemple), phénomène bien plus bref que les physiciens désignent par le terme de « collé-glissé » (*stick-slip*, en anglais). Dans le cas du rude glissement dans son tube volcanique de la colonne de roches sous-jacente à la caldeira de Miyake-jima, au Japon, en 2000, chaque train d'ondes sismiques de basses fréquences a duré de l'ordre de 50 secondes.

Quelle influence exerce l'effondrement à l'origine d'une caldeira sur l'éruption qui la provoque ? Avant l'éruption, la pression exercée par la colonne de roches est contrebalancée par la pression régnant dans le réservoir, éventuellement entretenue, voire augmentée, par l'arrivée de magma. Toutefois, la vidange du réservoir en cours d'éruption abaisse la pression ; cela entraîne éventuellement un abaissement partiel du piston, donc une remontée de la pression, laquelle favorise la poursuite de l'éruption. La descente de la colonne de roches ne s'arrête que lorsque la différence entre la pression qu'elle exerce sur le magma et la contre-pression exercée par ce dernier cesse d'excéder la résistance au cisaillement le long de la faille annulaire entourant le cylindre de roches.

© T.J. Casadevall, U.S. Geological Survey

Cependant, si la vidange magmatique continue, un nouvel effondrement se produira lorsque la différence de pression dépassera de nouveau la résistance au cisaillement. Plus le réservoir de magma se vidange vite, plus les périodes séparant deux baisses successives du piston sont brèves, de sorte que l'on s'attend à ce que la durée écoulée entre deux effondrements successifs soit inversement proportionnelle au débit de magma.

ET AU DOLOMIEU ?

Nous allons voir que les observations faites en 2007 confirment ce modèle de la formation d'une caldeira. Installée à 8,2 kilomètres du Dolomieu, la station sismique RER (pour « Rivière de l'Est à l'île de La Réunion ») du réseau Geoscope/IPGP était alors la seule capable d'enregistrer l'effondrement du Dolomieu sur une large bande de fréquences. Elle est en effet équipée d'un sismomètre vertical (qui mesure la composante verticale du mouvement du sol) et de deux sismomètres horizontaux (qui mesurent la composante horizontale du mouvement du sol). Lors d'un gonflement et d'un dégonflement de l'édifice volcanique, ces appareils (*voir la photographie page 62*) mesurent l'accélération du sol, ce qui détermine son inclinaison à proximité de la caldeira.

La variation de cette inclinaison peut résulter d'un afflux de magma dans la chambre magmatique ou de tout autre changement de régime du volcan, ou alors des forces exercées pendant la descente de la colonne de roches. Il nous fallait donc discriminer ces sources possibles de signal, d'autant plus que les tempêtes tropicales, les cyclones, les variations de température, etc. sont aussi susceptibles d'influer sur l'inclinaison du sol à long terme.

Toutefois, à court terme, ce sont surtout les marées terrestres – le gonflement du sol entraîné par l'attraction gravitationnelle de la Lune à son passage – qui induisent un bruit sismique, lequel s'ajoute au signal deux fois par jour. C'est pourquoi, avec Geneviève Roult, de l'IPGP, nous avons cherché à déduire de la mesure de l'inclinaison du sol à la station sismique RER la partie du signal due aux marées terrestres à cet endroit. Après que ma collègue a déterminé l'influence théorique de la marée terrestre à proximité de la caldeira du Dolomieu, nous avons pu isoler le signal associé seulement à l'effondrement. Il s'avère que l'amplitude maximale du déplacement du sol dû aux marées terrestres selon la direction nord-sud a atteint environ trois centimètres du 15 au 25 avril 2007. Nous avons ensuite aussi établi le catalogue des signaux sismiques d'effondrements ; nous en avons décelé 48, soit 4 de plus que ceux identifiés en 2011 par mes collègues de l'université de La Réunion et de l'IPGP.

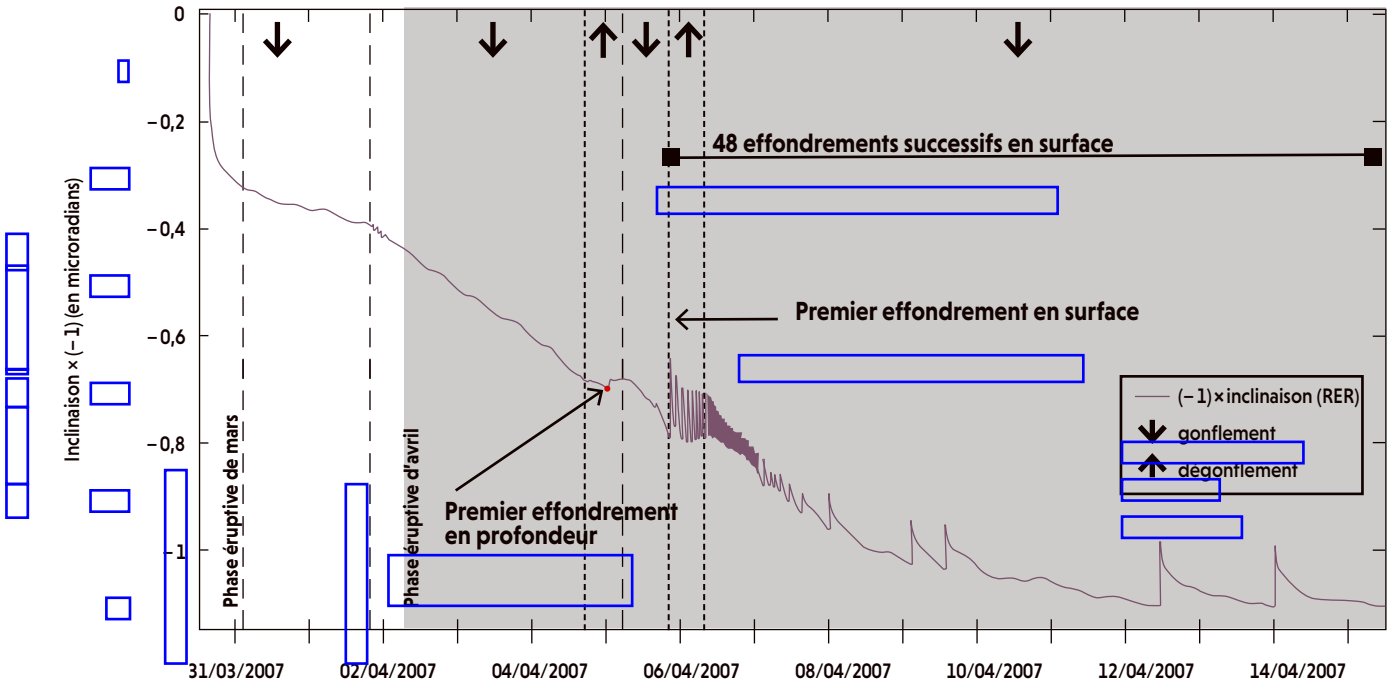
Il restait à préciser étape par étape le mécanisme à l'origine du séisme de magnitude 5 enregistré lors du principal effondrement. Avec mes collègues Babak Hejrani et Hrvoje Tkalčić, de l'université nationale australienne, nous avons croisé les données de la station RER avec celles d'autres stations non réunionnaises. Cette comparaison indique que le séisme s'est produit lorsque la pression du magma est brusquement descendue à une valeur insuffisante pour résister au poids de la colonne de roches reposant sur le toit de la chambre magmatique. Ainsi, le séisme de magnitude 5 n'a pas été entraîné par un classique affrontement de forces tectoniques comme pour la plupart des tremblements de terre, mais était plutôt dû au choc du brusque enfoncement de la chambre magmatique par le piston de roches.

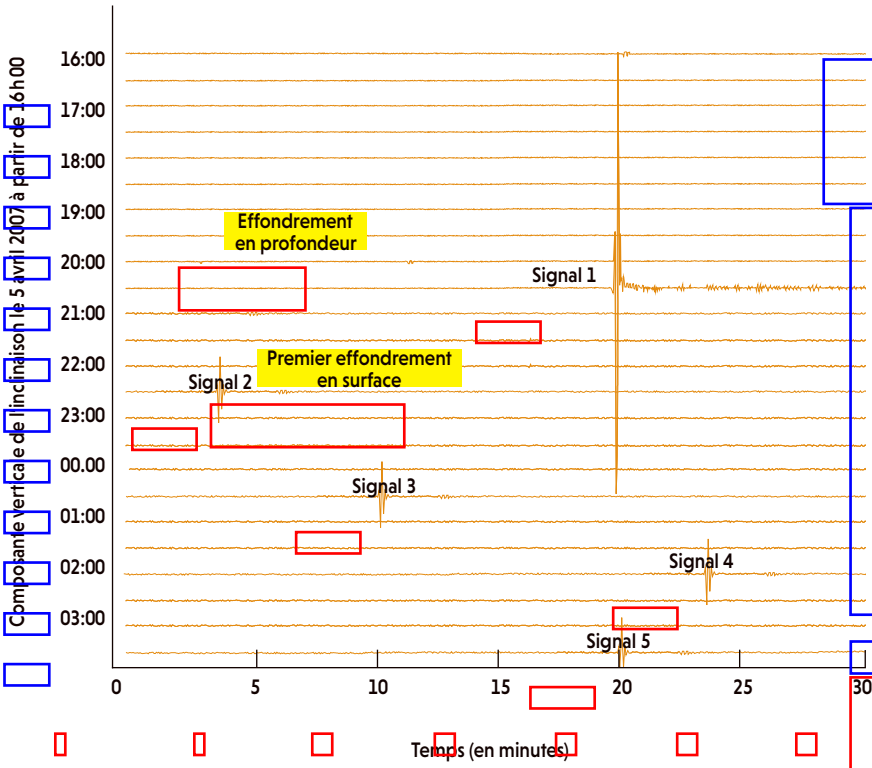
La variation cyclique de l'inclinaison est accompagnée de l'émission de paquets d'ondes de très longues périodes

UNE CHAMBRE MAGMATIQUE À 1 600 MÈTRES SOUS LE SOMMET

Avec Guilhem Barruol, de l'IPGP, et Dominique Reymond, du CEA, nous avons aussi déterminé la polarisation des signaux à très basses fréquences (de 0,003 à 0,01 hertz), c'est-à-dire la direction du vecteur vitesse des particules du sol par rapport à la direction de propagation des ondes. La détermination de cette grandeur est en effet précieuse : elle renseigne sur l'emplacement de la source du signal. Selon nous, celle-ci – donc la chambre magmatique aussi – se trouve entre 1 100 mètres sous le niveau de la mer et 900 mètres au-dessus. Dans ce dernier cas, la chambre magmatique se trouverait donc quelque 1 600 mètres sous le sommet du piton de la Fournaise.

En 2011, autour de Valérie Ferrazzini, de l'observatoire volcanologique du piton de la Fournaise, une équipe avait cherché à situer les sources sismiques en appliquant la technique dite de « relocalisation de la sismicité locale », qui est plus précise que la localisation classique >





Ces enregistrements de la station RER à très large bande passante mettent en évidence, à partir du 5 avril 2007, des cycles d'inclinaison de très longues périodes, que l'on associe aux à-coups de la descente de la colonne rocheuse surmontant la chambre magmatique *(en haut)*. Ces cycles s'accompagnent de paquets d'ondes de très longues périodes (très basses fréquences), d'une durée d'environ 20 secondes *(en bas)*. Cet ensemble de signaux a précédé le déclenchement de l'effondrement en surface non seulement du cratère du Dolomieu, mais aussi de celui de Miyake-jima, effondré en 2000. Le repérage automatique de ce type de signaux sismiques pourrait prévenir avec quelques heures d'avance de l'effondrement imminent d'une structure volcanique.

> des hypocentres et autres sources sismiques. Les chercheurs avaient utilisé le réseau de sismomètres spécialisés sur les ondes à courtes périodes – des « sismomètres courte période » – implanté sur le volcan.

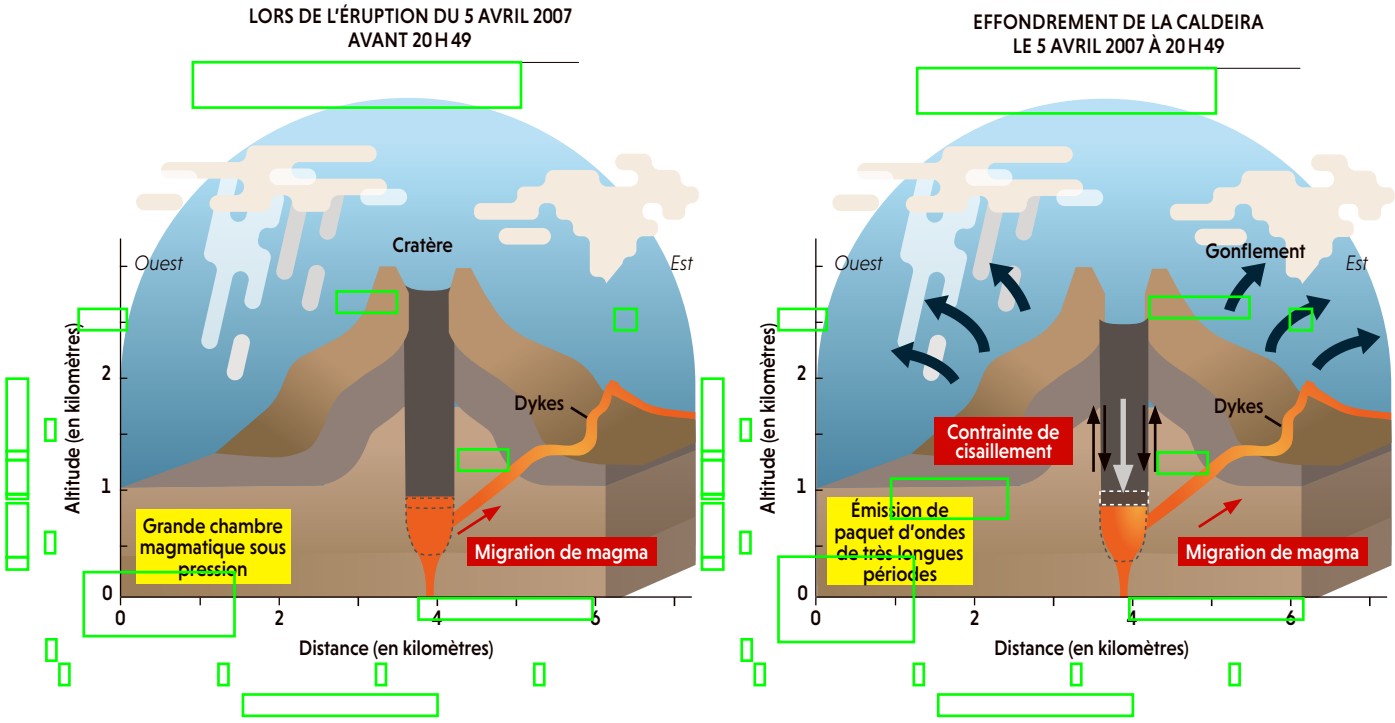
Frederick Massin, qui a travaillé sur ce sujet pendant sa thèse, m'a fourni la localisation des séismes enregistrés du 5 février au 1er mai 2007, et nous avons été agréablement surpris de constater que 70 % d'entre eux se situent entre le niveau de la mer et 800 mètres au-dessus, donc quelque 1700 mètres sous le sommet. Ainsi, tant nos calculs fondés sur la mesure de la polarisation des ondes de basses fréquences que la relocalisation grâce aux données des sismomètres courte période suggèrent que la chambre magmatique sous-jacente à la caldeira du Dolomieu se trouve environ 1700 mètres sous le sommet du piton de la Fournaise.

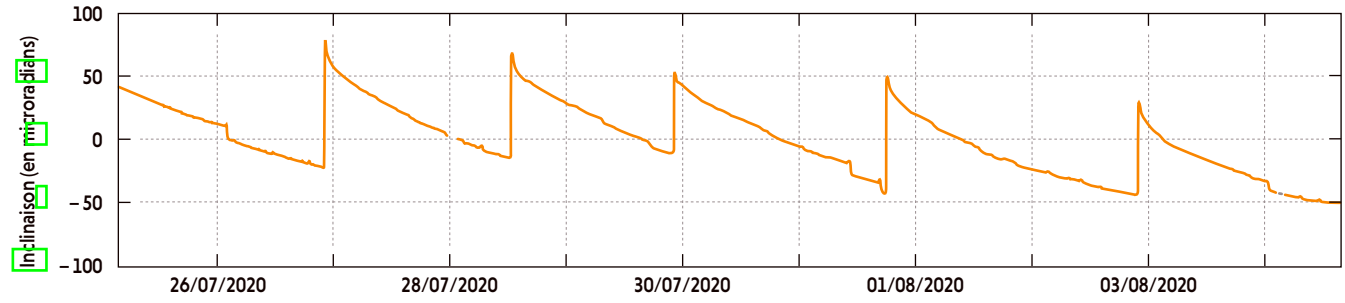
SIGNAUX PRÉCURSEURS ?

Tous ces travaux sur la formation de la caldeira du Dolomieu en 2007 ont largement précisé son déroulement, mais ils ont peut-être fait davantage. Au cours de notre étude, nous avons en effet identifié plusieurs types de signaux qui pourraient être annonciateurs de l'événement. Dans les enregistrements de la station sismique RER (*voir les cartes pages 56-57*), nous avons d'abord mis en évidence des cycles de variation de l'inclinaison du sol en relation avec chaque effondrement (*voir la figure ci-contre*). Ceux-ci s'accompagnent par ailleurs de paquets d'ondes de très basses fréquences et d'une durée d'environ 20 secondes, qui précèdent l'effondrement de la surface de la caldeira du Dolomieu.

La similitude de ces bouffées d'ondes suggère que chaque effondrement souterrain de la série qui a produit l'abaissement du sol de la caldeira s'est accompagné d'un processus mécanique répétitif (de type collé-glissé), à l'origine de ces émissions sismiques particulières. Si cette hypothèse tient, alors le premier effondrement en profondeur s'est produit approximativement vingt heures avant la rupture en surface. La mesure des variations cycliques de l'inclinaison du sol et des paquets d'ondes de très longues périodes qui les accompagnent nous offre donc la possibilité de détecter le premier effondrement en profondeur des heures avant celui, final, de la surface d'une caldeira.

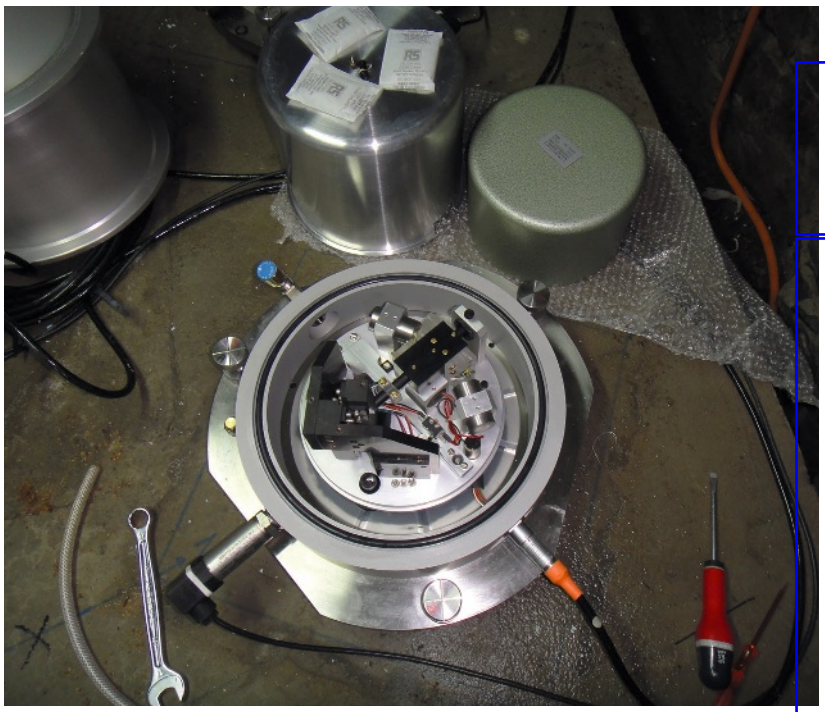
Ces signaux d'alertes pourraient être complétés par d'autres indices. Nous avons constaté que les effondrements qui se sont produits entre le 5 et le 14 avril 2007 (*voir la figure ci-dessous*) ont commencé après le début de l'éruption historique d'avril 2007, d'une façon suggérant qu'il existe un lien entre l'activité magmatique et les effondrements. Dès le 5 avril vers 10 heures, les chercheurs de l'observatoire volcanologique du piton de la Fournaise avaient noté une rapide augmentation du débit de magma qui, le 6 avril vers 12 heures, s'était traduite par un passage du débit de 75 mètres cubes par seconde à plus de 200 mètres cubes par seconde, et par l'apparition de fontaines de lave de plus de 200 mètres de hauteur. Ensuite, du 8 avril au 1er mai, l'éruption s'était poursuivie à faible intensité. >





La formation d'une caldeira correspond à un phénomène connu en physique sous le nom de « collé-glissé » (ou *stick-slip*), mais à l'échelle d'un volcan. Une colonne de roche n'est plus assez soutenue par une chambre magmatique parce que celle-ci se vidange par une fissure ; elle chute donc, mais par à-coups, car sa descente s'accompagne de l'intensification d'une résistance frictionnelle jusqu'à un point de rupture, puis le cycle descente-résistance-rupture recommence. Ces cycles s'accompagnent d'allers-retours très lents de l'inclinaison du sol à la surface du volcan, comme ce fut le cas par exemple à Hawaii du 25 juillet à 12 heures au 6 août 2018 *(graphique ci-dessus)*.

© Fabrice R. Fontaine/Pour la Science



L'un des capteurs STS-1 du sismomètre horizontal de la station sismique RER, installée au pied du volcan, à l'origine de l'observation des cycles de l'inclinaison du sol.

> Or parallèlement à ces variations du débit magmatique, des variations des écarts temporels entre cycles successifs d'inclinaison du sol à la station RER se produisaient. Ainsi, entre le 6 avril à 0 heure 48 et le même jour à 16 heures, les écarts temporels entre deux cycles d'inclinaison successifs (les intervalles de temps entre deux effondrements) ont diminué tandis que le débit magmatique augmentait ; puis, jusqu'au 8 avril à 4 heures 9, ces écarts ont augmenté tandis que le débit diminuait.

UN LIEN ENTRE DÉBIT DE LAVE ET VARIATIONS DE L'INCLINAISON

Ce tableau d'ensemble confirme le lien entre l'activité éruptive (donc de vidange de la chambre magmatique) et l'occurrence des signaux d'inclinaison associés aux effondrements, lien suggéré par le mécanisme d'effondrement que nous avons décrit. L'intervalle de temps entre deux cycles semble inversement proportionnel au débit du magma à travers une fissure éruptive latérale dans la chambre magmatique. Nous avons traduit cette idée en modélisant le système de chambre magmatique en vidange/colonne de roche descendante, et constaté aussi de cette façon la pertinence de l'idée que le débit magmatique à travers la fissure éruptive latérale contrôle la descente de la colonne de roche.

La modélisation analogique (par des formules décrivant le système) et numérique (par la description numérique du système) suggère que des effondrements se produisent en profondeur des heures avant tout effondrement en surface dans les cas où le « rapport de forme » du toit de la chambre magmatique est compris entre 2 et 4,5. Cette grandeur, définie par le quotient entre la profondeur et le diamètre, peut être estimée par une méthode d'imagerie sismique telle que la tomographie sismique.

Dans les cas de la caldeira du Vésuve en 79 de notre ère, de celle du Pinatubo, aux Philippines, en 1991, de celle de l'île volcanique de Miyake-jima, au Japon, en 2000, et de celle du Dolomieu en 2007, le rapport de forme était élevé. Il aurait par exemple été compris entre 1,9 et 3,8 pour Miyake-jima et se situait vers 4,25 dans le cas du cratère du Dolomieu.

Or, en 2012, des chercheurs japonais avaient décrit des effondrements précurseurs en profondeur à Miyake-jima à partir de l'observation de paquets d'ondes de très basses fréquences. Les observations effectuées au Dolomieu permettent désormais de conclure plus fermement que ces effondrements sont à associer à l'existence d'une chambre magmatique ayant un rapport de forme élevé à Miyake-jima.

En revanche, quand le rapport de forme est faible (inférieur à 1 typiquement), la modélisation suggère que l'effondrement d'une unique colonne de roche se produit en une fois et est accompagné d'un affaissement immédiat du fond de la caldeira. Ce fut probablement le cas lors de la formation de la caldeira de Fernandina, dans l'archipel des Galápagos, en 1968, où le rapport de forme de la chambre magmatique était d'environ 0,3.

SURVEILLER LE VOLCAN ?

Tous ces résultats suggèrent que la surveillance des cratères susceptibles de former des caldeiras implique de surveiller l'évolution du rapport de forme, puisque celui-ci peut évoluer si un nouveau réservoir magmatique apparaît. Dans les cas de chambres magmatiques ayant un rapport de forme assez élevé pour suggérer la possibilité d'effondrements profonds, l'identification de deux types de signaux – les cycles de variations de l'inclinaison et les paquets d'ondes de très longues périodes – permettra peut-être d'anticiper de quelques heures l'effondrement en surface.

Une telle avance de quelques heures serait-elle appréciable ? Oui, puisqu'en 1991, l'effondrement du cratère du Pinatubo, aux Philippines, a tué des centaines de personnes (*voir la photographie dans l'encadré page 58*). Le phénomène, qui accompagnait la deuxième plus importante éruption du XX^e^ siècle, est aussi associé à une chambre magmatique à rapport de forme élevé. Malheureusement, aucun sismomètre à large bande spectrale n'existait alors sur ce volcan, ni d'ailleurs la notion de ce qu'il aurait servi à surveiller. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. R. Fontaine *et al.*, **Very- and ultra-long-period seismic signals prior to and during caldera formation on La Réunion Island**, *Scientific Reports*, vol. 9, article 8068, 2019.

F. Marra, **Le volcan aux portes de Rome**, *Pour la Science*, n° 479, pp. 40-47, août 2017.

cité
sciences
et industrie

CONFÉRENCES

journée mondiale des intelligences animales

samedi 6 février 2021

© Rémy Marion

accès gratuit
sur réservation obligatoire
cite-sciences.fr

L'ANIMAL & L'HOMME

Détecter automatiquement les menteurs ?

Des logiciels d'analyse faciale prétendent déterminer si vous mentez ou dites la vérité lors d'un contrôle à l'aéroport, par exemple. Le problème, c'est qu'ils ne sont pas fiables.

Supposez que quelqu'un soit accusé d'un crime et clame vigoureusement son innocence. Voici une petite astuce pour déterminer rapidement s'il est coupable : demandez-lui de prendre une poignée de riz, de la mâcher pendant quelques instants, puis de la recracher devant vous. Si le riz est humide, la personne est innocente ; en revanche, si le riz est toujours sec, c'est la preuve qu'elle ment.

Cette « technique » peut prêter à sourire, mais elle a bel et bien été utilisée lors de certains procès dans l'Inde ancienne, comme le raconte Paul Trovillo, du laboratoire de police scientifique de Chicago. Et ce n'est qu'un exemple des multiples moyens fantaisistes employés par le passé pour détecter le mensonge, signe que les sociétés ont toujours vu un intérêt majeur dans l'identification des fraudeurs de toutes sortes. Mais saurait-on faire mieux aujourd'hui ?

La question a récemment pris une importance et une pertinence nouvelles. D'une part parce que d'un point de vue scientifique, les recherches sur le mensonge ont été prolifiques ces dernières décennies. D'autre part parce que d'un point de vue sociétal, on constate un besoin fort d'outils fiables pour repérer les >

L'ESSENTIEL

> Un projet européen vise à développer un outil de détection automatique des mensonges pour renforcer les contrôles aux frontières.

> Le problème est que cet outil ne semble pas utiliser les indicateurs les plus pertinents et que, même s'il le faisait, il serait loin d'être fiable à 100 %.

> Ce type de détecteur accuserait ainsi de nombreuses personnes sincères de mentir. En outre, il risque d'ouvrir la porte à une surveillance de masse d'une ampleur inédite.

L'AUTEUR

HUGUES DELMAS
chercheur en psychologie au Laboratoire parisien de psychologie sociale et au laboratoire Paragraphe, à l'université Paris 8

© Getty Images/EyeEm

> menteurs, avec la prolifération des *fake news* ou la demande d'une partie de la population d'une meilleure maîtrise des frontières.

C'est dans ce contexte qu'est né le programme de recherche européen *iBorderCtrl*, mené par un consortium impliquant notamment la Manchester Metropolitan University, en Angleterre. Il vise à développer un outil pour effectuer des vérifications renforcées aux frontières, sans ralentir le flux des passagers dans les aéroports. Sa singularité par rapport à d'autres systèmes de contrôle existants réside dans la création d'un module de détection automatique du mensonge (*Automatic deception detection system*, ou ADDS).

INTERROGÉ PAR UN AVATAR

Imaginez maintenant la scène suivante. Vous vous apprêtez à partir en vacances, en direction d'une somptueuse plage d'une île grecque. Vous allez donc prendre l'avion et effectuer quelques contrôles préalables, comme vous en avez l'habitude. Sauf que, cette fois-ci, vous devez vous préenregistrer sur une application web. Un avatar vous pose alors toute une série de questions sur votre identité et votre voyage, comme : « Quel est votre nom de famille ? » ou : « Que contient votre valise ? ». Votre webcam filme l'entretien, tandis qu'une intelligence artificielle analyse votre comportement non verbal. Pour chacune de vos réponses, elle livre son verdict : mensonge, vérité ou « indéterminé ». Le lendemain, en se fondant sur cette évaluation et sur les éléments complémentaires des contrôles aéroportuaires (comme la vérification du passeport), elle vous attribue un « niveau de risque » global. Si ce niveau est faible, vous passez sans encombre ; dans le cas contraire, vous êtes soumis à des contrôles supplémentaires.

Rassurez-vous, ce module n'en est qu'au stade expérimental et n'est pas réellement déployé dans les aéroports. Mais l'annonce de son élaboration a entraîné une controverse scientifique et un déchaînement de critiques – même si, selon ses concepteurs, l'objectif est d'aider la décision humaine et non de la supplanter. Dans un article paru dans le journal *The Guardian* fin 2018, Bennett Kleinberg, de l'University College de Londres, a ainsi qualifié ce système de « pseudoscientifique », tandis que le site internet iborderctrl.no milite contre son utilisation. Pourquoi une telle levée de boucliers ?

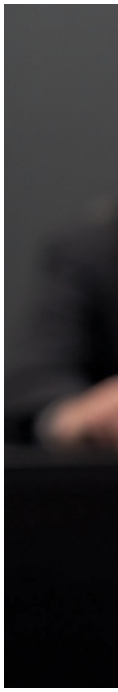
Rappelons déjà que nous sommes de piètres détecteurs de mensonges, puisque nous ne faisons guère mieux que le hasard. En effet, en nous fondant uniquement sur ce que nous captons par nos yeux et nos oreilles, nous débusquons la tromperie à hauteur de 54 % en moyenne. C'est ce qu'ont montré plusieurs expériences où des scientifiques présentaient des vidéos aux participants et leur demandaient si la personne filmée disait ou non la vérité.

LE NEZ DE PINOCCHIO N'EXISTE PAS

Plusieurs facteurs expliquent cette faible performance. D'abord, aucun indicateur ne permet à lui seul de repérer un mensonge de manière certaine : le nez de Pinocchio n'existe pas. Ensuite, de nombreuses idées reçues entravent notre arbitrage. La plus prégnante d'entre elles consiste à considérer qu'une personne qui ment est nécessairement nerveuse. En réalité, ce n'est pas toujours le cas ; et à l'inverse, une personne sincère est parfois stressée pour bien d'autres raisons, notamment la crainte de ne pas être crue. Mais la conséquence de cette idée reçue est que nous associons à la tromperie les diverses manifestations de nervosité : regard fuyant, agitation excessive, tics faciaux, clignements nerveux des yeux… Autant de comportements qui ne sont pas spécifiques du mensonge. Dans une expérience, des chercheurs ont par exemple compté les clignements d'yeux d'un menteur et de quelqu'un qui dit la vérité, et observé… qu'il n'y a aucune différence.

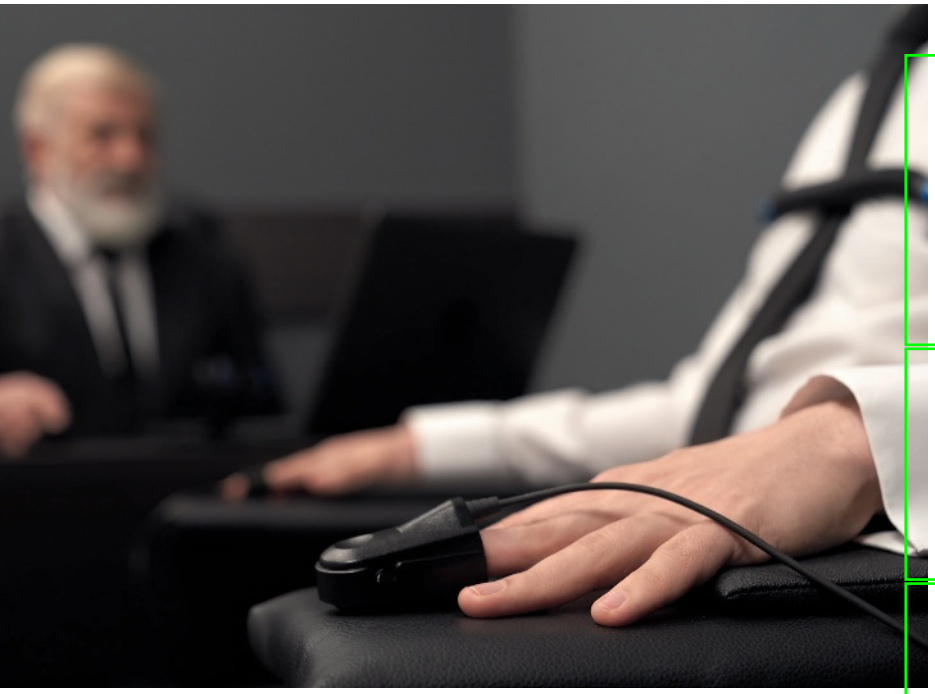
Un espoir d'améliorer les choses a un temps résidé dans les microexpressions, des expressions faciales qui passent sur le visage en moins de 500 millisecondes. Selon le psychologue américain Paul Ekman, elles trahissent les émotions que l'on souhaite réprimer ou masquer, ce qu'il qualifie d'*emotional leakage*, ou « fuite émotionnelle ». Un indicateur potentiellement précieux pour détecter les menteurs, dont les microexpressions ne seraient pas en accord avec ce qu'ils racontent (le coupable d'un vol aura par exemple une microexpression de joie lorsqu'il est en train de mentir, laissant transparaître le plaisir de duper son interlocuteur). Vous en avez peut-être déjà entendu parler, puisqu'elles ont été

Les très discrets indices comportementaux ne constituent en aucun cas une preuve absolue



La détection automatique de mensonges a des antécédents avec les polygraphes, appareils qui mesurent certains paramètres physiologiques de la personne interrogée, tels que son rythme cardiaque, sa pression sanguine, la conductance de sa peau… Ces dispositifs sont utilisés dans bon nombre de pays, mais leur fiabilité est controversée et leurs indications ne sont généralement pas prises en compte par les tribunaux.

© Serhii Bobyk / shutterstock.com



popularisées par la série télévisée *Lie to Me*. Son personnage principal, Cal Lightman, repère les mensonges au moindre mouvement facial qui lui paraît suspect.

La réalité scientifique est toutefois différente. Les recherches indiquent que les micro-expressions apparaissent très rarement sur les visages, de sorte que leur utilité est limitée. De plus, elles se manifestent indépendamment du fait que l'on cherche ou non à dissimuler ses émotions. Enfin, être formé à leur détection n'améliore pas la capacité à détecter les mensonges, selon une étude récente menée par Sarah Jordan et ses collègues de l'université de Huddersfield, au Royaume-Uni.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE À LA RESCOUSSE

Il existe tout de même quelques différences de comportements entre le mensonge et la vérité (une étude ayant par exemple montré que les menteurs ont tendance à davantage pincer les lèvres entre deux mots ou en début et en fin de phrase), mais elles posent deux types de problèmes. D'une part, elles constituent tout au plus des indices de mensonge, et en aucun cas une preuve absolue. D'autre part, ces différences sont si discrètes qu'il est en pratique impossible de les distinguer sans une analyse approfondie. C'est face à ce constat des piètres performances humaines qu'est né le projet de recourir à l'intelligence artificielle : un détecteur informatisé serait capable de capter d'infimes contractions musculaires et d'agréger plusieurs dizaines d'indicateurs. Froncements de sourcils, mouvements de la bouche, direction du regard… Les possibilités sont multiples.

Pour développer ce type d'outils, les scientifiques indiquent alors au système les paramètres qu'il doit analyser et lui soumettent des enregistrements de menteurs ou de personnes qui disent la vérité. Ces données alimentent un modèle statistique qui, après une phase d'apprentissage, se prononce sur la sincérité des déclarations qu'on lui soumet.

Dans le cas d'*iBorderCtrl*, le module de détection du mensonge se fonde sur des « microgestes », d'après ses concepteurs. Ceux-ci n'ont pas communiqué la nature exacte de ces indicateurs, qu'ils sont les seuls à évoquer dans la communauté scientifique. Nous savons juste qu'il s'agit d'infimes contractions musculaires, susceptibles de durer plus ou moins longtemps, mais nous n'avons aucune donnée sur la pertinence de leur utilisation dans ce contexte.

Une étude publiée en 2016 par Lin Su et Martin Levine, de l'université McGill, au Canada, pourrait toutefois nous donner quelques éléments de réponse. Ces chercheurs ont développé un outil de détection des mensonges qui semble se rapprocher de celui d'*iBorderCtrl*, car il se fonde également sur une série d'indicateurs faciaux (comme certains mouvements des sourcils) extraits de manière automatique. Lin Su et Martin Levine l'ont testé avec des vidéos de vrais et de faux appels à témoins diffusées par les médias. Dans les deux cas, les personnes filmées disaient rechercher un de leurs proches disparu, mais dans les vrais appels à témoin, elles étaient sincères alors que dans les faux, elles avaient en réalité tué le prétendu disparu (une vidéo montrait ainsi Susan Smith, condamnée à perpétuité pour avoir assassiné deux de ses enfants). Résultat : l'intelligence artificielle a correctement identifié les menteurs dans 77 % des cas.

Les concepteurs d'*iBorderCtrl* ont communiqué un taux de détection supérieur à 70 % (*voir la figure page 68*), ce qui serait cohérent avec cette étude. Toutefois, pour atteindre des taux de fiabilité qui justifieraient leur emploi dans le cadre du contrôle douanier ou de la lutte antiterroriste, il faudrait que ces systèmes fassent bien mieux que cela. Peut-être en incluant une analyse du langage ?

En effet, après plus de cinquante ans de recherches sur le sujet, les résultats montrent globalement une supériorité des indicateurs >

54 %

C'est le taux moyen de bonnes réponses chez les humains qui tentent de détecter un mensonge chez autrui, soit à peine mieux que le hasard. Ce taux dépasse souvent les 70 % pour les systèmes automatiques, mais cela reste très insuffisant.

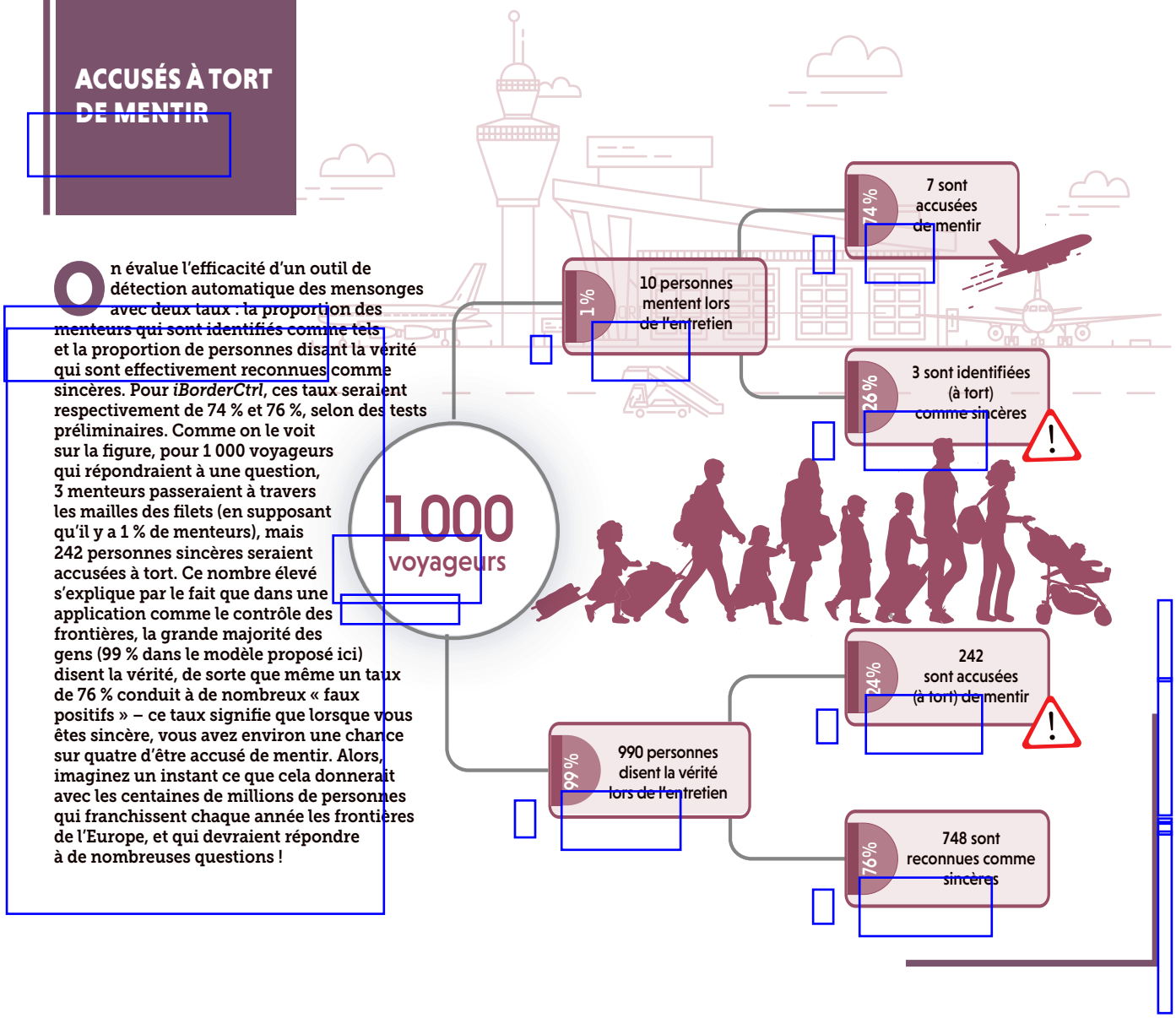
> linguistiques pour évaluer la crédibilité, par rapport aux indicateurs paraverbaux (le ton de la voix, la longueur des pauses, etc.) et aux comportements non verbaux (les gestes, les postures, etc.) : grâce à « une métaanalyse » portant sur ces recherches, Bella DePaulo, de l'université de Virginie, a par exemple montré en 2003 que les récits de menteurs sont moins détaillés que les versions d'individus sincères. En d'autres termes, si l'on cherche à tirer une histoire au clair, mieux vaut bien écouter et se concentrer sur ce qui est dit plutôt que de chercher à observer les indices corporels ou vocaux. Là encore, *iBorderCtrl* gagnerait probablement à creuser dans cette direction, en incluant des indicateurs linguistiques.

Un autre problème est que ce système a été entraîné et préalablement testé sur un nombre assez restreint de personnes, environ une trentaine. Cela peut se traduire par une limitation bien connue en intelligence artificielle, nommée l'« *overfitting* ». C'est-à-dire que le modèle risque de ne pas être généralisable à d'autres individus, notamment ceux qui parleraient une autre langue ou s'exprimeraient différemment.

D'après le site officiel d'*iBorderCtrl*, l'outil a tout de même été éprouvé dans des conditions quasi réelles en 2019, sur la base du volontariat, aux frontières de la Hongrie, de la Grèce et de la Lituanie. Ses développeurs n'ont communiqué aucune donnée sur les résultats,

ACCUSÉS À TORT DE MENTIR

On évalue l'efficacité d'un outil de détection automatique des mensonges avec deux taux : la proportion des menteurs qui sont identifiés comme tels et la proportion de personnes disant la vérité qui sont effectivement reconnues comme sincères. Pour *iBorderCtrl*, ces taux seraient respectivement de 74 % et 76 %, selon des tests préliminaires. Comme on le voit sur la figure, pour 1 000 voyageurs qui répondraient à une question, 3 menteurs passeraient à travers les mailles des filets (en supposant qu'il y a 1 % de menteurs), mais 242 personnes sincères seraient accusées à tort. Ce nombre élevé s'explique par le fait que dans une application comme le contrôle des frontières, la grande majorité des gens (99 % dans le modèle proposé ici) disent la vérité, de sorte que même un taux de 76 % conduit à de nombreux « faux positifs » – ce taux signifie que lorsque vous êtes sincère, vous avez environ une chance sur quatre d'être accusé de mentir. Alors, imaginez un instant ce que cela donnerait avec les centaines de millions de personnes qui franchissent chaque année les frontières de l'Europe, et qui devraient répondre à de nombreuses questions !



© Shutterstock.com/GoodStudio ; © Shutterstock.com/Chief Crow Daria

mais la mésaventure de la journaliste italienne Ludovica Jona donne une idée de ce qui attendrait nombre de voyageurs avec un tel détecteur automatique de mensonges. Elle a réussi à expérimenter le système lors de cette phase de tests. Pour un résultat édifiant : le système l'accusait de mentir sur sa date de naissance, sa citoyenneté, le lieu de délivrance de son passeport et sa destination ! Elle a finalement été considérée comme « à risque », alors qu'elle avait été sincère lors du préenregistrement.

DES QUESTIONS ÉTHIQUES ET SOCIÉTALES

Car n'oublions pas que 70 % de réussite, cela veut dire 30 % d'échec, ce qui est loin d'être négligeable. Concrètement, ces erreurs consistent à considérer soit un menteur comme sincère, soit une personne sincère comme menteuse. Et même si l'on parvenait à améliorer considérablement la fiabilité, cela signifierait que sur les centaines de millions de voyageurs qui franchissent chaque année les frontières de l'Union européenne, plusieurs millions seraient soupçonnés à tort de mentir ! Tandis que bien des personnes pouvant présenter un risque sécuritaire passeraient à travers les mailles du filet…

Ce n'est qu'une des nombreuses questions éthiques que soulève l'utilisation de l'intelligence artificielle dans ce contexte. Quelles seraient les conséquences d'une telle gouvernance technologique ? Comment la concilier avec les libertés fondamentales et le respect de la vie privée ? En développant de tels outils, n'ouvre-t-on pas la porte à une surveillance de masse d'une ampleur jamais observée ?

Pour l'heure, *iBorderCtrl* n'en est qu'au stade de la recherche et on ignore quand il sera mis en application – ni même s'il le sera vraiment. Mais une tendance de fond se dégage quant à l'accélération de la mise en place de dispositifs de surveillance dans le monde. La Chine dispose déjà de 200 millions de caméras de surveillance et compte atteindre le cap des 600 millions dans un an. Des algorithmes sont déjà utilisés pour détecter les baisses de motivation des ouvriers dans les usines ou des élèves à l'école. En France, la reconnaissance faciale va être testée dans les lieux publics pour une durée de un an, censément sous le contrôle de chercheurs et de membres de la société civile.

Cette situation appelle deux remarques essentielles. Premièrement, au fil de ces développements, il sera capital de rester au plus près des données scientifiques concernant ces dispositifs, pour avoir conscience de ce qu'ils peuvent faire et de ce qu'ils ne peuvent pas faire. Cet article poursuit cet objectif en montrant clairement qu'aucun système de ce type ne pourrait décemment être mis en application à l'heure actuelle.

> **C'est une situation entièrement nouvelle pour notre constitution mentale**

Deuxièmement, il s'agira de décider avec clairvoyance des domaines de la vie publique où l'interdiction de mentir sera promulguée et punie avec le renfort de moyens technologiques. Le cerveau et la psyché humaine ont évolué en partie grâce à la capacité de taire certaines pensées et d'énoncer des faits différents – clairement, de mentir (c'est notamment une part importante de ce qu'on appelle la « théorie de l'esprit »).

Cette situation est donc entièrement nouvelle pour notre constitution mentale et il ne faut pas sous-estimer ses risques potentiellement destructeurs. Si l'humain s'est accommodé depuis des millénaires de l'obligation morale de dire la vérité dans certaines circonstances (on dit bien aux enfants de ne pas mentir, après ils font ce qu'ils veulent…), rien ne nous garantit qu'il saura le faire avec l'obligation physique de dévoiler le fond de sa pensée, sans aucune échappatoire. Un homme transparent serait-il encore un homme ? Il ne faudrait pas que les recherches en psychologie autour de ces questions prennent trop de retard sur celles qui visent la seule détection du mensonge. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Sánchez-Monedero et L. Dencik, **The politics of deceptive borders : « Biomarkers of deceit » and the case of iBorderCtrl**, *Information, Communication & Society*, en ligne le 3 août 2020.

S. Jordan *et al.*, **A test of the micro-expressions training tool : Does it improve lie detection ?**, *J. Investig. Psychol. Offender Profil.*, vol. 16, pp. 222-235, 2019.

B. Elissalde *et al.*, **Le mensonge - Psychologie, applications et outils de détection**, Dunod, 2019.

S. Porter *et al.*, **Secrets and lies : Involuntary leakage in deceptive facial expressions as a function of emotional intensity**, *Journal of Nonverbal Behavior*, vol. 36, pp. 23-37, 2012.

à lire

THEMA
L'intelligence artificielle

Une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* ou *Cerveau & Psycho* sur l'intelligence artificielle, ses succès, ses limitations, ses risques.

Hors-série numérique en vente seulement sur : boutique.pourlascience.fr

L'ESSENTIEL

> Dans les années 1950, alors que l'archéologie en Amazonie n'en était qu'à ses balbutiements, une jeune américaine, Betty Meggers, y lança de grands programmes de recherche en formant localement des disciples.

> Elle imposa aussi sa vision de la région à l'époque précolombienne : une terre stérile inapte à accueillir de grandes populations et de l'agriculture intensive.

> Pendant plusieurs décennies sa vision domina la discipline, mais, dans les années 1980, une autre Américaine, Anna Roosevelt, cristallisa l'opposition montante.

> Ses découvertes conduisirent à une vision d'une Amazonie précolombienne prospère, toujours d'actualité.

L'AUTEUR

STÉPHEN ROSTAIN
directeur de recherche au CNRS au sein de l'unité Archéologie des Amériques (CNRS, université Paris I)

Les pionnières de l'archéologie amazonienne

Au XXe siècle, deux femmes de caractère, Betty Meggers et Anna Roosevelt, prouvèrent que l'Amazonie précolombienne était un terrain archéologique tout aussi riche que la Mésoamérique.

© Avec l'aimable autorisation de José Oliver

« Tous les archéologues du Brésil pourraient entrer dans un seul van ! », plaisantait, il y a une cinquantaine d'années, l'anthropologue nord-américain Robert Carneiro. C'était vrai, très peu de chercheurs fouillaient alors le passé de l'Amazonie. Les choses ont bien changé de nos jours. Mais se souvient-on que l'archéologie amazonienne est née sous l'impulsion d'intrépides et vaillantes chercheuses qui ont dû s'imposer dans une discipline traditionnellement dominée par les hommes ? Betty Jane Meggers fut de ces guerrières de la science. Cette Nord-Américaine arriva sur le terrain à la moitié du XXe siècle, éliminant sans pitié la concurrence. Par exemple, elle évinça sa compatriote, la pauvre Helen Palmatary, qui tissait alors patiemment les fils d'une classification précise de la céramique de l'Amazone inférieur. Quelques commentaires cinglants publiés dans des recensions des livres de sa rivale et des critiques assassines au sein de la communauté académique suffirent à Betty Meggers pour écarter définitivement Helen Palmatary de l'Amazonie, laquelle ne réapparut jamais dans ce domaine de la recherche. C'est dire si les débuts de l'archéologie furent tumultueux dans cette région.

Aujourd'hui, l'étude du passé y est en majorité menée par des femmes. Les raisons de cette situation exceptionnelle sont floues, remontant peut-être à l'époque de la dictature au Brésil, de 1964 à 1985, qui aurait laissé des métiers à la valeur déconsidérée aux mains des femmes ; mais, jusqu'à présent, aucune étude spécifique n'a été réalisée pour le démontrer. Quoi qu'il en soit, avant même l'ascension des militaires au pouvoir, des femmes pionnières ont durablement marqué l'archéologie.

Il y a cinq cents ans, les premiers conquistadors espagnols avaient cru voir des femmes guerrières diriger des hommes au combat à la >

Betty Meggers et son mari Clifford Evans dans le village amérindien de Yarabana, au Venezuela *(au premier plan, une habitante du village)*, dans les années 1950.

© Stéphen Rostain, avec l'aimable autorisation de Betty Meggers

Betty Meggers fouillant un site funéraire au nord de l'embouchure de l'Amazone, au Brésil, en 1948 *(ci-contre)*. Sur l'île de Marajó, dans l'estuaire de l'Amazone, Betty Meggers et son mari découvrent de nombreuses urnes funéraires anthropomorphes et polychromes comme celle de la page ci-contre.

> confluence du Tapajós et du bas fleuve. La légende ainsi forgée de communautés de femmes indépendantes camouflées dans la forêt avait été si tenace qu'elle avait conduit à baptiser l'immense espace amazonien du nom des fameuses cavalières combattantes des textes de la Grèce antique. Si les pionnières de l'archéologie amazonienne sont, elles, bien réelles, elles ont été tout aussi guerrières et conquérantes que leurs mythiques prédécesseuses.

UN MONDE IGNORÉ

L'archéologie amazonienne est âgée d'à peine plus de cent ans. Durant les périodes coloniales puis l'indépendance, au XIXe siècle, les antiquités de la région ont suscité peu d'intérêt, de même que le monde amérindien contemporain. Certes, quelques savants s'étaient interrogés sur l'évolution des humains et sur l'origine indigène ou exogène des Amérindiens, mais le traitement du sujet était resté anodin. Ce n'est qu'à la fin du XIXe siècle qu'apparurent de timides balbutiements d'une archéologie amazonienne. Les premiers à s'essayer à l'exercice furent des anthropologues.

Le Brésilien Domingos Soares Ferreira Penna, d'abord, se passionna pour ce monde ignoré. Ayant découvert de nombreux sites dans l'embouchure de l'Amazone, il écrivit plusieurs articles sur l'ethnographie et l'archéologie de la région, puis fonda le musée de Belém, premier du genre en Amazonie. Puis le nouveau siècle marqua un tournant avec l'arrivée en Amazonie de chercheurs européens au savoir encyclopédique. Anthropologues de vocation,

LES AMÉRINDIENS ET LA FORÊT : UNE INTERACTION FERTILE

Les Amérindiens ont profondément transformé l'Amazonie, que ce soit sa végétation, la nature des sédiments ou même le modelé du sol. Le manteau végétal couvrant la région est beaucoup moins naturel que son exubérance le laisse croire, les premiers peuples ayant désherbé, planté, multiplié, croisé, associé ou amélioré les espèces. Rien que dans le foyer amazonien, il existe au moins 86 plantes natives présentant un certain degré de domestication. Les Amérindiens ont également modifié les sols en créant la *terra preta* – « terre noire » en portugais. C'est un sol composite, sombre et fertile, enrichi avec des débris d'occupation, du charbon et des cendres. Il résulte de très longues et denses implantations humaines le long des principales rivières. Les anciennes populations ont enfin changé la morphologie même de la superficie en creusant et surélevant la terre sans limite. Il faut imaginer une Amazonie précolombienne

Champs surélevés précolombiens en rangées de petites buttes sur la plaine côtière inondable du Suriname.

© Stephen Rostain, avec l'aimable autorisation de Betty Meggers

Betty Meggers révéla l'archéologie amazonienne au monde

© Stephen Rostain

traversée de chemins permanents et parsemée de tertres, de digues, de canaux et fossés, de bassins et réservoirs, de champs surélevés *(voir la figure)*. Dense, chaude et humide, la sylve amazonienne fut le berceau d'un fertile et heureux mariage entre humanité et nature, dont la postérité est encore tangible.

archéologues à l'occasion, curieux à plein temps, ils dévoilèrent des pans entiers de la vie amérindienne en arpentant le terrain. Les plus connus sont le Suédois Erland Nordenskiöld, dont Helen Palmatary était l'élève, le Suisse Emilio Augusto Goeldi et l'Allemand Curt Nimuendajú. Ces ethnologues produisirent des travaux essentiels qui font encore autorité aujourd'hui. Toutefois, aussi brillants furent-ils, ils se contentaient souvent de collecter des vases ou, au mieux, de dessiner des plans sommaires de sites.

Il fallut attendre les lendemains de la Seconde Guerre mondiale pour que l'archéologie amazonienne obtienne ses lettres de noblesse. Ce furent deux femmes nord-américaines qui les lui servirent : Betty Meggers et Anna Roosevelt. Betty Meggers peut être considérée comme la mère de ce champ de recherche sous ces tropiques. En 1943, elle n'était encore qu'une jeune étudiante se faisant les dents dans un musée de son pays sur une petite collection céramique de l'île de Marajó, une île côtière de l'embouchure de l'Amazone. Elle alla ensuite sur le terrain, avec celui qui deviendrait son mari, pour explorer l'embouchure du grand fleuve afin d'y conduire leurs recherches doctorales sur l'archéologie de l'estuaire. Son futur époux, Clifford Evans, était en effet également archéologue, mais resta toujours en retrait bien qu'omniprésent, telle une ombre silencieuse derrière la grande dame. On a parfois reproché à cet homme disparu prématurément son effacement, d'être trop discret, voire secret. Une attitude qui n'avait pourtant rien d'étonnant dans un pays où il n'était pas rare que les archéologues servent non seulement la science, mais aussi leur pays en le tenant informé de la situation locale en toute discrétion.

Le gros ouvrage qui, en 1957, naquit de la prospection archéologique du bas Amazone constitua le socle de la recherche postérieure, jusqu'à être désigné par quelques-uns comme la « bible » de l'archéologie d'Amazonie. Sans tomber dans ce genre d'excès, il faut quand même reconnaître qu'il y a un avant et un après Meggers. Pendant un demi-siècle, elle domina cette discipline, édictant de rigides paradigmes et une discipline sévère à la communauté de chercheurs.

LE RÈGNE SANS PARTAGE DE BETTY MEGGERS

En premier lieu, elle révéla véritablement l'archéologie amazonienne au monde, dévoilant un passé plus complexe que celui imaginé. Pour ce faire, elle établit des séquences chronoculturelles précises en plusieurs points – bas Amazone, Guyana, Équateur – qui font encore autorité aujourd'hui. Elle fut également une avocate précoce des datations absolues, par radiocarbone ou thermoluminescence. De plus, elle favorisa les développements locaux de l'archéologie en lançant de grands programmes scientifiques et en formant des chercheurs nationaux dans plusieurs pays sud-américains, autant de disciples qui répandirent sa méthodologie et ses paradigmes chez eux tout en constituant un réseau tentaculaire autour de Meggers. Enfin, souvent de façon péremptoire, elle affirma que le bassin amazonien n'avait pu >

> accueillir de grandes populations durant l'époque précolombienne, ni supporter une agriculture intensive.

De fait, dès ses débuts, Meggers défendit bec et ongles le déterminisme écologique, qui voulait que la géographie décide de la culture. Il faut dire qu'à l'époque, cette théorie venue des États-Unis dominait la pensée anthropologique. Elle était notamment portée par l'anthropologue Julian Steward, qui avait édité, entre 1946 et 1949, cinq volumes du *Handbook of South American Indians* (le «Manuel des Indiens d'Amérique du Sud») dans lesquels il classait les sociétés d'Amérique du Sud en cinq grands types qui définissaient leur niveau de complexité, correspondant chacun à une aire géographique déterminée, sur la base des stratégies d'adaptation supposées des Amérindiens, établies à partir de généralisations.

Pour l'Amazonie, ces généralisations étaient par exemple la culture du manioc sur brûlis, une occupation de l'espace avec mobilité périodique ou l'utilisation de ressources fluviales comme protéines de base. Le «modèle de tribu de forêt tropicale», appliqué sans discernement à l'ensemble du peuplement amazonien, représentait des communautés semi-nomades, obligées de cultiver temporairement des parcelles de forêt déboisées par le feu pour en augmenter la trop faible fertilité et pêchant dans les rivières pour compléter en protéines la consommation des tubercules de manioc. Le problème du recours à ces aspects est qu'ils ne caractérisaient que des sociétés amérindiennes coloniales déjà fortement déstructurées par le choc de la conquête et en cours de recomposition. Quoi qu'il en soit, ce déterminisme environnemental connut un ample succès et le modèle de culture de forêt tropicale domina pendant un demi-siècle.

L'AMAZONIE DE MEGGERS, UNE TERRE STÉRILE

Meggers construisit sa carrière en s'appuyant sur l'idée de cet environnementalisme prégnant. En 1971, elle publia ainsi un livre qui se voulait définitif sur le potentiel amazonien, intitulé *Amazonia, Man and Culture in a Counterfeit Paradise* («Amazonie, homme et culture dans un paradis contrefait»). Elle s'ingéniait à y démontrer que les basses terres infertiles avaient provoqué la stagnation culturelle des habitants de l'Amazonie. Elle considérait qu'aucune société n'avait pu y connaître de développements complexes à cause d'un milieu défavorable, toute innovation culturelle étant vue comme un apport extérieur. Bien plus, elle expliquait que des communautés «avancées» étaient descendues vers l'est depuis les Andes pour peupler la grande forêt, la traversant jusqu'à atteindre l'embouchure du fleuve. Là, à Marajó – une île de la superficie de la Suisse –, elles avaient fleuri un temps, édifiant d'impressionnants tertres de terre le long des rivières et fabriquant de grosses urnes funéraires au décor anthropomorphe raffiné. Hélas, les miasmes délétères de ce milieu tropical humide auraient eu raison d'elles et auraient anéanti leur culture avant l'arrivée des Européens.

Pour appuyer son obsession de la stérilité amazonienne, elle donnait l'exemple des entreprises industrielles nord-américaines qui avaient avorté au début du XX^e^ siècle. Par exemple, Henry Ford avait eu l'idée de cultiver d'énormes champs d'hévéas afin de disposer de toute la matière première nécessaire à ses pneus de voiture. Il avait même construit une ville utopique sur le modèle de la société nord-américaine, baptisée de son nom: Fordlândia. Mais un champignon avait eu raison de ses arbres et le projet avait périclité, causant presque la faillite de son empire. Ce type de référence saisissante convainquit nombre de chercheurs qui acceptèrent alors l'idée du désert vert stérile incapable d'héberger des populations prospères.

Malgré les apports méthodologiques de Meggers, l'archéologie amazonienne a stagné durant des années. En effet, personne ne se posait plus la question culturelle des habitants précolombiens. On se contentait de les comparer directement aux populations actuelles. Ce n'était plus le vestige ou la trace qui servaient de guide à l'archéologue, mais une analogie ethnographique directe non contextualisée. Ce faisant, on niait le choc microbien de la conquête européenne qui avait décimé près de 90 à 95% des Amazoniens aux XVI^e^-XVII^e^ siècles, tout comme les reconstructions sociétales qui s'étaient ensuivies. On privait ainsi de passé les premiers occupants

À LIRE

Stéphen Rostain a récemment publié Amazonie, l'archéologie au féminin, Belin, 2020. Cet ouvrage a reçu le grand prix du Livre d'archéologie 2020.

© Avec l'aimable autorisation de José Oliver

d'Amazonie pour simplement calquer dessus l'état contemporain très transformé des groupes amazoniens. C'était un peu comme si on avait utilisé l'ethnographie des Lacandons et des Mayas actuels pour reconstruire l'histoire des Mayas précolombiens ou si l'on avait décrit les Incas sur la base de l'observation des paysans quichuas modernes des Andes. Les préjugés et les *a priori* avaient pris le pouvoir sur l'analyse scientifique.

Pour autant, il serait injuste de nier tout l'apport de Meggers. Il faut se rappeler qu'avant son travail, l'archéologie de l'Amazonie était superbement ignorée, les pyramides mayas de Mésoamérique et les temples incas des Andes captant toute la lumière des scientifiques et du public. Les trouvailles précolombiennes de la jungle étaient reléguées, dans le meilleur des cas, au rang de jolies potiches anecdotiques. C'est bien Meggers qui a hissé ce champ de la discipline au niveau d'une science reconnue et digne d'intérêt. Ce faisant, elle a suscité de nombreuses vocations chez les jeunes générations. Et ce sont ces mêmes apprentis qui se sont opposés aux théories de la pionnière de l'archéologie amazonienne.

ET POURQUOI PAS UNE AMAZONIE FERTILE ?

Sur la base de longues enquêtes de terrain, quelques anthropologues commencèrent à combattre l'idée du fatalisme qui aurait dirigé les modes d'occupation et de vie des Amérindiens en forêt. Bien au contraire, ils réussirent à mettre en évidence une relation de réciprocité profitable avec ce milieu à mauvaise réputation. L'opinion négativiste de l'environnement sylvicole était en réalité l'apanage des Occidentaux. L'un des premiers à contredire l'opinion de Meggers fut l'archéologue Donald Lathrap, qui fouillait alors en haute Amazonie, au Pérou. Dans son ouvrage *The Upper Amazon* («Le haut Amazone») publié en 1970, c'est-à-dire à peu près au même moment que celui de Meggers clamant le contraire, il affirma que loin d'avoir été un simple réceptacle d'influences externes, l'Amazonie centrale avait été un foyer important de développement culturel et aurait fonctionné comme un cœur irradiant des flux de peuplement dans diverses directions (*voir la figure page 77*). Selon lui, l'Amazonie n'était pas débitrice de grands courants culturels, mais bien créatrice.

Une décennie plus tard, grâce aux observations accumulées durant leurs séjours dans des villages autochtones, les anthropologues américains William Balée, Robert Carneiro et Darell Posey, et leur confrère français Philippe Descola, démontrèrent mousse et pampre qu'elle était en réalité beaucoup moins «sauvage» qu'en apparence, car les Amérindiens avaient une action déterminante sur cet environnement. Par la suite, les recherches des archéologues, botanistes, pédologues et écologues prouvèrent que cela avait aussi été le cas autrefois, avec une ampleur encore plus grande à l'époque précolombienne (*voir l'encadré page 72*).

S'inscrivant dans cette mouvance de remise en cause des idées préconçues, c'est encore une femme qui prit le flambeau de la contestation et d'une archéologie renouvelée. Dans les années 1980, Anna Roosevelt lança de gros programmes de fouille, d'abord sur le moyen Orénoque, au Venezuela, puis dans le bas Amazone, au Brésil. Moins engoncée dans les codes de la typologie stricte, Anna Roosevelt s'appuya, plutôt avec bonheur, sur son intuition scientifique. Alors que les données de >

© Stéphen Rostain

Anna Roosevelt sur les lieux de sa fouille à Parmana, au Venezuela, en 1975, avec les archéologues Fred Olsen et José Maria Cruxent *(à gauche)*, et plus récemment dans les savanes côtières inondables de Guyane française, où se trouvent des champs surélevés précolombiens *(à droite)*.

> terrain demeuraient parfois impénétrables, elle eut souvent des éclairs qui lui permettaient de connecter des informations dispersées afin de proposer des interprétations novatrices.

Ce fut par exemple le cas lors de son projet au Venezuela. Contrairement à une idée préconçue, souvent acceptée dans l'archéologie amazonienne de l'époque, elle constata qu'en réalité les restes de plantes carbonisées étaient abondants dans les dépôts archéologiques domestiques. Elle a ainsi collecté 372 grains de maïs dans des niveaux de fouille datés entre 600 avant notre ère et 1500 de notre ère. Cela peut sembler peu, mais pour les archéologues une telle découverte est considérable. Anna Roosevelt s'est appuyée sur celle-ci pour forger l'hypothèse d'une agriculture reposant en majorité sur le maïs depuis quelques siècles avant la conquête européenne. Une proposition que d'autres recherches entreprises ailleurs en Amazonie ont confirmée plus de vingt ans après.

Anna Roosevelt balaya ainsi la vieille certitude que le manioc avait été de tout temps, comme de nos jours, la plante dominante du régime alimentaire amazonien. L'archéologue suggéra que le manioc avait été la principale plante originellement cultivée sur les champs surélevés, de petites buttes de terre disposées géométriquement dans les savanes saisonnièrement inondées. Puis que le maïs l'avait remplacé il y a environ mille deux cents ans. Ce changement correspondait d'ailleurs à l'expansion vers l'est, jusqu'à la côte des Guyanes, des agriculteurs sur champs surélevés de la région.

Une carte gastronomique des sociétés en place au dernier millénaire avant la conquête européenne se dessinait peu à peu. Certains Amérindiens fondaient leur subsistance sur la culture des tubercules ou du grain, mais ne dédaignaient pas le gibier de chasse et de pêche, tout comme la collecte de mollusques d'eau douce. D'autres préféraient exploiter en priorité les ressources aquatiques, tandis que quelques-uns étaient exclusivement pêcheurs, chasseurs ou plutôt collecteurs. Ces différentes populations entretenaient en outre des relations commerciales étroites pour échanger leurs aliments, mais également leurs objets manufacturés, leurs produits locaux et même leurs femmes.

ANNA ROOSEVELT ET LE BÂTON DE « TEDDY BEAR »

Ainsi, les découvertes d'Anna Roosevelt contrediront radicalement les affirmations de Betty Meggers. Loin de n'être que de passives marionnettes de la forêt, les Amérindiens avaient développé des cultures très avancées tout en profitant des bienfaits insoupçonnés de leur environnement. Bien plus, les berges des grands fleuves avaient connu un peuplement dense et avaient été le berceau d'innovations spectaculaires, comme la céramique ou la domestication de nombreuses plantes. Ainsi, la plus ancienne poterie des Amériques avait été élaborée en aval de l'Amazone, dans des abris-sous-roche et sur des tertres de coquillage. Ces sites, fouillés par Anna Roosevelt, détrônèrent ceux de culture Valdivia de la côte pacifique d'Équateur, longtemps considérés comme le premier foyer céramique. Ils prouvèrent que mille cinq cents ans auparavant, vers 4500-6000 ans avant notre ère, les Amazoniens s'essayaient déjà à la terre cuite.

LE CAUCHEMAR DE L'ARCHÉOLOGUE

Dans les années 1950, Betty Meggers et Clifford Evans quittèrent la façade atlantique de l'Amazonie pour explorer le piémont des Andes, où ils prospectèrent la vallée du Napo, en Équateur. À leur retour à Washington, les deux savants rédigèrent un livre rendant compte de leurs belles découvertes. Texte édité, dessins, photographies et tableaux partirent chez l'imprimeur avec d'autres manuscrits académiques. Et là ce fut le drame, la hantise de tout chercheur. Un mois plus tard, l'imprimeur appela, impatienté car il attendait toujours les originaux. L'horrible vérité se fit jour : à la suite d'une succession de mauvaises manipulations, tout était parti au pilon. Un an de travail avait fini dans un broyeur avant d'être brûlé. À l'époque, pas de sauvegarde sur disque dur, tout était dessiné à la main et rédigé à la machine à écrire. Avec le peu de documents restants, toute l'équipe de l'institut Smithsonian se mit à la tâche pour reconstituer le plus fidèlement possible le livre prévu, qui sortit finalement en 1968.

Plat funéraire au décor multicolore de culture Napo (Équateur), luxueusement présenté dans le livre de Betty Meggers et Clifford Evans en 1968.

© Stéphen Rostain

Betty Meggers prit ces idées comme un crime de lèse-majesté. Elle entama alors une guerre intellectuelle sans merci contre sa concitoyenne hérétique. À partir des années 1980, les deux chercheuses se livrèrent un combat mutuel, aucune n'épargnant son adversaire pour faire admettre son opinion au plus grand nombre. Betty Meggers prenait un malin plaisir à recenser dans des revues scientifiques chaque nouvelle publication de sa meilleure ennemie. Elle invalidait par exemple la pertinence de ses fouilles en montrant que des niveaux stratigraphiques ne se joignaient pas sur un dessin de coupe ou que les comptages ne correspondaient pas. De son côté, Anna Roosevelt s'ingéniait à démonter pièce par pièce les argumentaires de Betty Meggers, dénonçant la proposition de l'introduction de la poterie depuis le Japon tout en défendant l'existence du foyer céramique plus ancien qu'elle avait fouillé en Amazonie inférieure. Les noms d'oiseaux fusaient, mais cela ne volait pas toujours très haut. Armée du même bâton qu'affectionnait son illustre arrière-grand-père, le président états-unien Theodore Roosevelt, pour mener ses débats (le président Roosevelt, «Teddy Bear», disait à propos de la politique étrangère qu'«il faut parler calmement tout en tenant un gros bâton»), l'archéologue imposa peu à peu son point de vue.

UNE POLÉMIQUE DURABLE

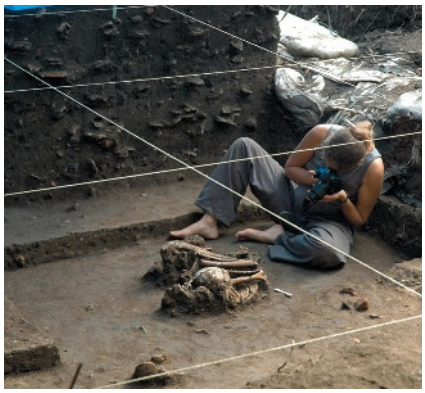
Un irréconciliable conflit opposait donc systématiquement Betty Meggers à Anna Roosevelt. La première clamait que le «paradis contrefait» de l'Amazonie ne pouvait soutenir de fortes populations, tandis que sa contradictrice affirmait que cette forêt sempervirente tropicale avait connu de fortes démographies et des avancées technoculturelles essentielles. Les récentes découvertes de la recherche donnent plutôt raison à cette dernière. Même si les découvertes postérieures, à partir des années 1990, ont invalidé certaines inférences d'Anna Roosevelt, comme celle de denses communautés peuplant des villages très étendus, sa vision d'une Amazonie précolombienne prospère demeure beaucoup plus convaincante que son opposée.

La polémique ne s'est pas pour autant éteinte aujourd'hui. Elle a intégré plusieurs disciplines scientifiques tout en se déplaçant vers le champ de l'écologie. Ainsi, toute publication des adeptes de l'écologie historique – une approche qui observe les dynamiques paysagères induites par l'interaction des humains et du milieu sur le temps long – provoque immédiatement une réponse des écologues plus stricts, et *vice versa*. En fait, cette opposition est surtout formelle, car leurs acteurs sont en réalité souvent en grande partie d'accord sur le fond. Cette controverse a au moins l'avantage d'enrichir le débat tout en rendant particulièrement visible, par >

LES ANCIENS MODÈLES DE PEUPLEMENT DE L'AMAZONIE

À partir des années 1950, Betty Meggers défendit l'idée que les civilisations avaient émergé en Amérique du Sud selon un modèle diffusionniste : les développements culturels seraient nés dans les Andes puis descendus vers l'Amazonie de l'est *(flèches blanches)*. Mais en 1970, l'archéologue Donald Lathrap lui opposa un modèle cardiaque : de grandes vagues culturelles se seraient répandues à partir de l'Amazonie centrale *(flèches rouges)*. Aujourd'hui, les chercheurs reconnaissent plutôt plusieurs foyers culturels distincts en Amazonie. Meggers soutenait aussi le classement de niveaux culturels en fonction de la géographie proposé en 1948 par l'anthropologue Julian Steward : les empires de hautes civilisations dans les Andes, les chefferies théocratiques et militarisées au nord et dans les Grandes Antilles, les villages fermiers des tribus dans la forêt tropicale, les hameaux fermiers dans le désert, les groupes nomades pêcheurs et collecteurs dans le cône sud. Plus personne n'accrédite cette classification.

© Pour la Science ; d'après © Cartarium /Shutterstock.com



Trois représentantes de la nouvelle génération. La Brésilienne Anne Rapp Py-Daniel est la première spécialiste de l'archéologie funéraire en Amazonie *(à gauche)*. La Bolivienne Carla Jaimes Betancourt, tamisant ici des sédiments, se dédie à l'archéologie des Llanos de Mojos, immenses étendues herbeuses inondables de son pays *(au centre)*. La Brésilienne Gabriela Prestes-Carneiro a lancé l'étude des ossements de poisson, comme ici sur le monticule artificiel de coquillages de Monte Castelo *(à droite)*.

> l'abondance de publications qu'elle suscite, l'interaction des humains et de la nature en Amazonie à l'époque précolombienne.

Reste que le point de désaccord des spécialistes concerne le réel impact humain précolombien sur les écosystèmes amazoniens et, de là, sur la démographie ancienne. Les interprétations s'appuient maintenant sur des données quantifiées allant de l'observation macroscopique à celle microscopique, avec des moyens techniques de pointe. Pourtant, la virulence des débats n'a rien perdu en intensité. Dans certaines publications et surtout lors de congrès, on continue d'étriper à volées d'adjectifs, on abat par salves de soupçons et on lynche à coups d'articles vénéneux. Le terreau de l'archéologie amazonienne moderne a donc été un violent conflit radical d'écoles de pensée conduit par deux femmes aux convictions fermes.

UN RICHE HÉRITAGE, TOUJOURS AU FÉMININ

Ainsi, peu à peu à partir des années 1980, l'archéologie a pris un nouveau visage, moins engoncé dans de vieux préjugés et plus ouvert aux idées nouvelles. Dans le même temps, les méthodologies des disciplines connexes ont connu également des progrès notables, qui révolutionnaient les méthodologies de terrain et de laboratoire. Des perspectives insoupçonnées se sont alors ouvertes aux chercheurs dans la lecture des registres du sol, des plantes, des charbons, des isotopes et autres éléments microscopiques marqueurs d'événements passés.

Les méthodes de terrain ont aussi radicalement changé grâce à des approches interdisciplinaires et des collaborations multiculturelles impliquant les peuples autochtones. Les techniques se sont améliorées, notamment dans la collecte et l'analyse des données dans les disciplines dites «de l'archéométrie». Le chercheur réussit maintenant à entrer dans l'intimité des plantes par les microrestes botaniques, des vestiges osseux par les isotopes, ou des sols par les carbones et autres nutriments. Par exemple, en grattant des outils de pierre utilisés pour la cuisine ou des récipients céramiques de cuisson, on arrive à récupérer des grains d'amidon ou des phytolithes, des microparticules de silice dont l'aspect est propre à chaque espèce de plante, ce qui permet de déduire quelles plantes y furent préparées et consommées.

Dans un autre domaine, le lidar aéroporté, une méthode de télédétection optique, perce la canopée de son faisceau de lumière laser pour fournir une image précise du modelé de la superficie vierge de toute végétation, permettant ainsi de repérer des terrassements précolombiens. De plus, la science n'est plus confinée aux mains d'obscurs académiques cloîtrés dans leur tour d'ivoire. De nouvelles préoccupations apparaissent comme la pratique d'une archéologie publique, l'intégration dans l'éducation des populations, la conservation du patrimoine culturel autochtone ou la protection des ressources culturelles et écologiques.

Ainsi, à ses débuts, l'archéologie amazonienne se satisfaisait d'un schéma lisse et carré qui comprimait l'histoire du peuplement dans un paradigme déterministe réducteur. Mais, depuis, une recherche plus objective et adaptée a pointé à l'inverse vers plus de diversité, avec une myriade de cas particuliers qui ne rentrent pas dans une norme unique. Là encore, si les hommes ont participé à ce dynamisme, ce sont les femmes qui ont joué un rôle de premier plan. Nombreuses sont celles qui ont conduit des projets scientifiques et soutenu des thèses de doctorat. Logiquement, elles ont accédé à des postes dans les universités, les musées et les institutions de recherche. De fait, aujourd'hui encore, la recherche archéologique amazonienne est en grande partie menée par des femmes. En 2017, elles étaient 468 pour 385 hommes à la Société d'archéologie brésilienne et, dans la section amazonienne, 91 femmes pour 59 hommes. Du moins en archéologie, les Amazones ne sont plus un mythe. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Rostain, **Amazonie, l'archéologie au féminin**, Belin, 2020.

S. Rostain, **Amazonie. Les 12 travaux des civilisations précolombiennes**, Belin, 2017.

C. Fernandes Caromano *et al.*, **Nem todas são Betty ou Anna : o lugar das arqueólogas no discurso da arqueologia amazônica**, *Revista de arqueologia*, vol. 30(2), pp. 115-129, 2017.

© Val Moraes *(à gauche)* © Heiko Prümers *(au centre)* ; © Francisco Pugliese *(à droite)*

ABONNEZ-VOUS À

POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
	29 % de réduction *	**31 %** de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris – email : boutique@pourlascience.fr

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

PAG21STD

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

☐ FORMULE **PAPIER**
- 12 n° du magazine papier

4,90€ PAR MOIS -29 %

DPV4E90

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

6,50€ PAR MOIS -31 %

PPV6E50

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€ PAR MOIS -43 %

IPV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

E-mail : ..... @ .....

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 58.14 Z

CHANGER DE NUMÉRATION AVEC LE SYSTÈME « ESPERLUETTE »

Comment convertir facilement l'écriture décimale d'un entier en son écriture dans une autre base de numération ? Certaines procédures permettent de le faire… sans avoir à calculer !

RENDEZ-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*

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)

Le système décimal de numération de position est une merveille de simplicité et de puissance qui, pourtant, n'a été disponible dans sa forme actuelle qu'à partir du VI^{e} siècle en Inde et n'est arrivé en Europe qu'à la fin du X^{e} siècle. Il a donné naissance aux systèmes positionnels en base b (b entier positif), dont le système binaire qui est central en informatique.

Nous allons voir comment on peut, sans savoir calculer et en menant uniquement des manipulations locales sur une chaîne de caractères, écrire un nombre quelconque en base 2 ou même en base $b>2$. Ces méthodes douces de conversion se fondent sur l'existence de systèmes de numération mixtes associant par exemple la notation unaire (ou «notation bâton», chaque unité étant représentée par un bâton) et la notation binaire, ou associant unaire et décimal. Elles conduisent aussi aux systèmes à plusieurs étages tels que le système informatique du «décimal codé binaire». Nous procéderons progressivement en commençant par le système «esperluette» de règles pour la base 2, dont les clés de fonctionnement conduiront aux systèmes mixtes, puis aux systèmes à plusieurs étages.

De nombreuses informations présentées ici m'ont été communiquées par Roland Yéléhada, un lecteur de la rubrique qui m'a fait parvenir une longue lettre datée du 12 septembre 2020. À ma connaissance, les systèmes décrits ici sont originaux.

Les systèmes de règles de type esperluette ne nécessitent aucune compréhension de ce qu'on fait. Ils sont plus intéressants pour concevoir des programmes informatiques que pour opérer à la main, car ils manipulent de longues séquences de caractères. Il est amusant de découvrir que, même en 2021, on peut encore progresser dans la mise au point de méthodes destinées à représenter et manipuler les nombres entiers.

Rappelons que le nombre qui s'écrit $a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1 a_0$ en base positionnelle b représente l'entier : $a_n b^n + a_{n-1} b^{n-1} + \dots + a_2 b^2 + a_1 b^1 + a_0 b^0$. En base 2, la suite 1101 représente donc l'entier :

$1\times2^3+1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0 = 8+4+0+1 = 13$.

Le plus souvent, on impose aux entiers a_i d'être compris entre 0 et $b-1$, mais il est parfois utile de s'affranchir de cette limitation, et c'est d'ailleurs une technique utilisée en informatique pour manipuler de grands nombres.

Lorsque nous manipulerons plusieurs bases de numération en même temps, nous indiquerons en indice la base utilisée ; par exemple, $13_{10} = 1101_2$. Venons-en à notre premier système de règles.

LE SYSTÈME ESPERLUETTE POUR LA BASE 2

Le symbole typographique & porte le nom d'«esperluette» ou «*et* commercial» et aurait été introduit par Tiron, le secrétaire de Cicéron. Ce sera le nom général des systèmes de règles que nous allons décrire. Le premier et le plus simple concerne la base 2. Il permet la conversion des entiers en binaire sans même avoir à connaître la notion de puissance. Il fonctionne avec trois >

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

1 LE SYSTÈME DÉCIMAL DE POSITION

Le système de numération décimal positionnel a été conçu progressivement en Inde. Passant par les pays arabes grâce au mathématicien Al-Khwarizmi (vers 780-850) dont le nom nous a donné le mot « algorithme », il n'est arrivé en Europe qu'à la fin du Xe siècle. C'est à Gerbert d'Aurillac, devenu le pape Sylvestre II en 999, qu'on doit cette introduction. Il écrivit des traités sur les opérations arithmétiques et il inventa un abaque fondé sur le système décimal positionnel, c'est-à-dire un système de calcul avec des jetons où, selon leur position, ils représentent plusieurs unités, dizaines, centaines, etc. Grâce à son ouvrage *Liber abaci* de 1202, Léonard de Pise, *alias* Fibonacci, contribua cette fois d'une façon définitive à la diffusion du système, qui fut progressivement adopté partout en Europe.

Gerbert d'Aurillac, le pape de l'an mil *(ici à la droite de l'empereur Otton III)*, était astronome et mathématicien.

2 L'ORIGINE DU SYSTÈME BINAIRE

On a trouvé en Chine, dès le IXe siècle avant notre ère, des versions partielles du système binaire pas toujours destinées à compter, par exemple les 64 hexagrammes (I-Ching) qui sont la liste complète des figures composées de six traits horizontaux continus ou discontinus empilés. Un traité de Leibniz écrit en français en 1703 (*Explication de l'arithmétique binaire qui se sert des seuls caractères 0 et 1 avec des remarques sur son utilité et sur ce qu'elle donne le sens des anciennes figures chinoises du Fuxi*, https://bit.ly/3kwQOjQ) fournit la première explication claire du système binaire qu'il note comme nous avec des 0 et des 1. Le système binaire est essentiel en informatique, où il permet de représenter des nombres avec des mémoires à deux états (cartes perforées, positions d'un curseur, états électriques, etc.).

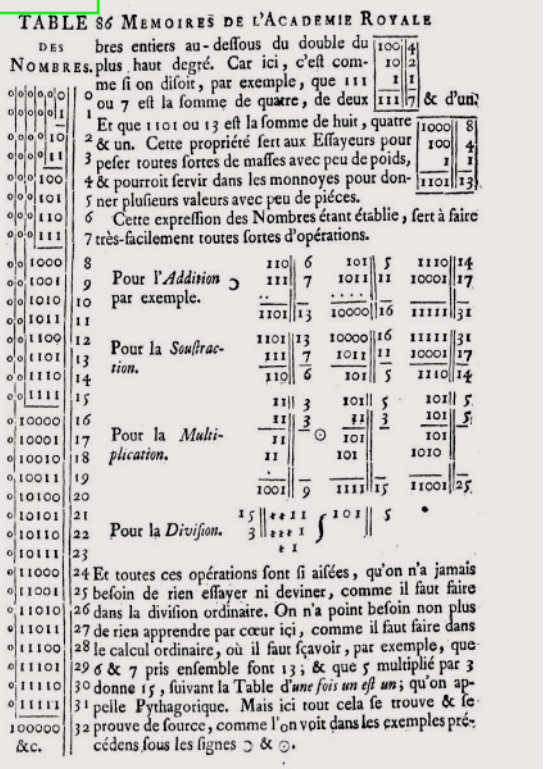


TABLE 86 MEMOIRES DE L'ACADEMIE ROYALE

DES NOMBRES.

bres entiers au-dessous du double du plus haut degré. Car ici, c'est comme si on disoit, par exemple, que 111 ou 7 est la somme de quatre, de deux & d'un.

Et que 1101 ou 13 est la somme de huit, quatre & un. Cette propriété sert aux Essayeurs pour peser toutes sortes de masses avec peu de poids, & pourroit servir dans les monnoyes pour donner plusieurs valeurs avec peu de piéces.

Cette expression des Nombres étant établie, sert à faire très-facilement toutes sortes d'opérations.

Pour l'*Addition* par exemple.

Pour la *Soustraction*.

Pour la *Multiplication*.

Pour la *Division*.

Et toutes ces opérations sont si aisées, qu'on n'a jamais besoin de rien essayer ni deviner, comme il faut faire dans la division ordinaire. On n'a point besoin non plus de rien apprendre par cœur ici, comme il faut faire dans le calcul ordinaire, où il faut sçavoir, par exemple, que 5 & 7 pris ensemble font 13; & que 5 multiplié par 3 donne 15, suivant la Table d'*une fois un est un*; qu'on appelle Pythagorique. Mais ici tout cela se trouve & se prouve de source, comme l'on voit dans les exemples précédens sous les signes ☽ & ☉.

Une page du mémoire de Leibniz de 1703.

En haut : Domaine public (The Yorck Project (2002) 10.000 Meisterwerke der Malerei) ; en bas : domaine public

> règles élémentaires, qui s'écrivent avec 24 symboles ou caractères en tout.

Dans la présentation des règles, x et y désignent des suites (éventuellement vides) quelconques de symboles pris parmi 0, 1 et &.

TROIS RÈGLES POUR PASSER AU BINAIRE

Règle $r1$: $\&x \to 0\&x$
Règle $r2$: $x0\&\&y \to x\&0y$
Règle $r3$: $x0\&y \to x1y$

La règle $r1$ signifie que si une suite de symboles pris parmi 0, 1 et & commence par &, on peut introduire un 0 devant la suite. La règle $r2$ signifie que si, dans une suite de symboles pris parmi 0, 1 et &, on trouve quelque part la séquence 0&&, alors on peut remplacer celle-ci par &0. De même, la règle $r3$ permet de remplacer 0& par 1.

Opérons, grâce à ces trois règles, la conversion de l'entier 5 écrit en unaire, &&&&&, pour obtenir son expression binaire, à savoir 101 :

$\underline{\&}\&\&\&\& \to_{r1} \underline{0\&}\&\&\& \to_{r2} \&\underline{0\&}\&\& \to_{r2} \&\&\underline{0\&} \to_{r1} 0\&\underline{0\&} \to_{r2} \&\underline{00\&} \to_{r1} 0\&\underline{00\&} \to_{r3} 1\underline{00\&} \to_{r3} 101$.

On a indiqué à chaque fois la règle utilisée et on a souligné l'endroit de la suite de symboles sur lequel la règle agit. Autre conversion, cette fois de « onze fois & » vers 1011 :

$\&\&\&\&\&\&\&\&\&\&\& \to_{r1} 0\&\&\&\&\&\&\&\&\&\&\& \to_{r2} \&0\&\&\&\&\&\&\&\&\&\& \to_{r2} \&\&0\&\&\&\&\&\&\&\& \to_{r2} \&\&\&0\&\&\&\&\& \to_{r2} \&\&\&\&0\&\&\&\& \to_{r2} \&\&\&\&\&0\&\&\& \to_{r1} 0\&\&\&\&\&0\&\&\& \to_{r2} \&0\&\&\&\&0\&\& \to_{r2} \&\&0\&0\& \to_{r1} 0\&\&0\&0\& \to_{r1} \&00\&0\& \to_{r1} 0\&00\&0\& \to_{r3} 100\&0\& \to_{r3} 1010\& \to_{r3} 1011$.

La conversion se fait de la notation unaire de n, c'est-à-dire n fois le symbole &, vers la notation binaire de n, et cela sans manipuler de puissances de 2 et sans rien avoir à connaître d'autre que les trois règles.

Si l'on utilise $r3$ trop tôt, on pourrait se retrouver bloqué, comme dans cet exemple : $\&\&\&\&\& \to_{r1} 0\&\&\&\&\& \to_{r3} 1\&\&\&\&$. Pour que la conversion fonctionne, il faut donc s'imposer de n'utiliser $r3$ que lorsque les règles $r1$ et $r2$ ne sont plus utilisables. En revanche, $r1$ et $r2$ sont utilisables librement, dans l'ordre que l'on veut.

Les manipulations pour convertir un nombre assez petit se font à la main sur une feuille de papier. Mais bien évidemment, pour les grands nombres, le procédé ne peut concerner qu'une machine programmée pour appliquer les règles. Notons qu'une machine sans processeur arithmétique conviendrait : elle doit seulement savoir reconnaître certaines séquences et opérer des ajouts ou des substitutions. Avec les règles $r1$, $r2$ et $r3$, aucune compétence en calcul n'est requise pour convertir un nombre en base 2 !

D'où vient le miracle ? Bien sûr, on peut tester le système et découvrir qu'il fonctionne toujours bien. Mais soyons sérieux et prouvons que la méthode est infaillible.

L'idée de la démonstration est de donner un sens numérique à toute suite finie de symboles

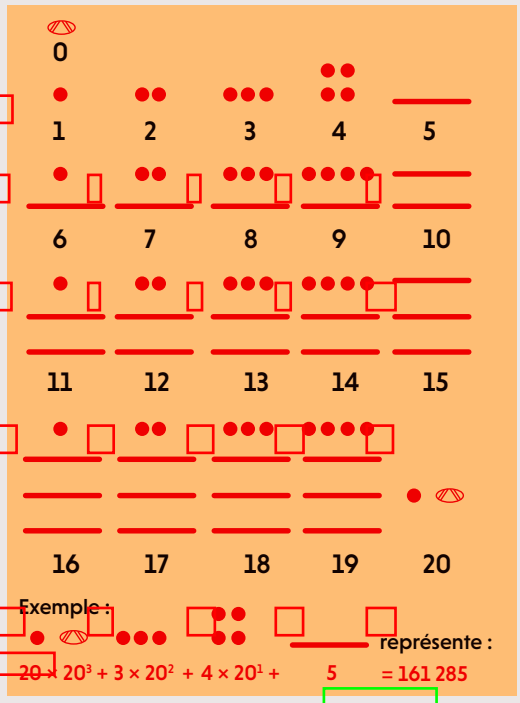
3 LA NUMÉRATION MAYA

La numération maya a été utilisée entre le IIIe et le XIIIe siècle avec plusieurs variantes. Nous en présentons une version simplifiée pour illustrer l'idée des systèmes de numération à deux étages.

Il s'agit en première analyse d'une numération de position en base 20, numération dite « vicésimale » ou « vigésimale ». Nous utilisons 10 chiffres pour notre numération de position décimale, il en aurait donc fallu 20 pour le système maya. Les Mayas se sont contentés de trois symboles : un pour le zéro (une sorte de coquille), un autre désignant l'unité (un rond noir), et un troisième (une barre horizontale) qui représente 5 ronds noirs.

Cette notation des chiffres peut être vue comme une notation unaire, légèrement perfectionnée en regroupant les paquets de 5 ronds noirs. Sans ces regroupements, le système maya serait un pur système à deux étages en base 20 et unaire, comme le texte de l'article en définit avec des règles de manipulation ne demandant aucun calcul.

L'utilisation de la base 20 est naturelle, car c'est le nombre de doigts et d'orteils. Les systèmes en base 20 n'ont pas été utilisés seulement par les Mayas et, d'ailleurs, avec notre « quatre-vingts », nous en gardons encore une trace aujourd'hui en français (voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_vicésimal).



© d'après http://dominique.melotti.pagesperso-orange.fr/maya.htm

pris parmi 0, 1 et &, ce qui d'ailleurs définit un système de numération mixte de représentation des entiers, combinant unaire et binaire.

On attribue une valeur numérique à toute suite de 0, 1 et &. Par exemple, pour &&&11&0&110, on considère que la suite représente un entier qui est la somme de deux composantes.

- Composante A: on ne retient que les 0 et les 1, dans l'ordre, soit 110110, qu'on lit comme une écriture en base 2. Ici, 32+16+4+2 = 54.

- Composante B: on considère que chaque & représente 2^i, où i est le nombre de symboles 0 ou 1 placés à sa droite. Le dernier & de notre exemple représente donc 8, celui un peu plus à gauche, 16, et chacun des trois & du début, 64. Au total, les & représentent donc 8+16+64+64+64 = 216.

Finalement, le nombre représenté par &&&11&0&110 est 54+216 = 270.

Le secret du système esperluette est alors facile à percer:

- Quand on utilise les règles $r1$, $r2$ et $r3$, on ne change pas le nombre représenté par la somme des composantes A et B de la séquence que l'on transforme.

- Au départ, quand il n'y a que des &, le nombre représenté est le nombre de fois que & est répété, car il n'y a que la composante B, où chaque symbole compte pour $2^0 = 1$. À l'arrivée, quand on s'est débarrassé de tous les &, le nombre représenté est celui qu'on obtient en lisant les 0 et 1 comme un nombre en écriture binaire, car il n'y a plus que la composante A.

- Ainsi, quand on réussit à passer d'une écriture avec n fois & à une écriture avec uniquement des 0 et des 1, l'entier représenté par les composantes A et B est resté le même à chaque étape de transformation, et donc la transformation opère la conversion de n en écriture binaire.

Reste à contrôler ce qui, pour l'instant, a été affirmé sans preuve: appliquer une règle $r1$, $r2$ ou $r3$ ne change pas le nombre représenté en additionnant les composantes A et B.

C'est bien clair pour $r1$, car les zéros en tête d'une écriture binaire ne comptent pas. La règle $r2$ remplace 0&& par &0. Elle remplace donc deux & qui valaient chacun 2^i, où i est le nombre des 0 et 1 à droite de ces deux &, par un & qui vaut 2^{i+1} puisqu'il y a un chiffre 0 en plus à sa droite. Dans le décompte de la composante B, on remplace donc $2^i + 2^i$ par 2^{i+1}, ce qui ne le change pas. On ne change pas la composante A en appliquant $r2$. Le total ne change donc pas avec $r2$. Un raisonnement du même type montre que $r3$ ne change pas l'entier représenté.

Pour être certain que la méthode consistant à appliquer toujours $r1$ et $r2$ en priorité fonctionne, il faut s'assurer qu'on ne reste pas bloqué. Cela résulte de ce que les 0 introduits par $r1$ se déplacent uniquement vers la droite et ne sont arrêtés que lorsque la suite de symboles ne comporte plus deux & consécutifs, situation où l'utilisation de $r3$ ne peut pas faire réapparaître deux & consécutifs, et où, appliquée de manière répétée, elle fait disparaître tous les &.

AJOUTER DE NOUVELLES RÈGLES

Le système de trois règles est celui nécessaire pour la conversion d'un nombre de la notation unaire à la notation binaire. Pour avoir un système permettant la conversion inverse du binaire vers le unaire, il suffit d'ajouter les règles inversées.

Règle $r1'$: $0\&x \rightarrow \&x$

Règle $r2'$: $x\&0y \rightarrow x0\&\&y$

Règle $r3'$: $x1y \rightarrow x0\&y$ >

4

LE DÉCIMAL CODÉ BINAIRE

Le système de numération vigésimale maya *(voir l'encadré 3)* peut être vu, en le simplifiant, comme un système de numération à deux étages. Il existe cependant deux domaines où l'utilisation d'un système à deux étages fut indubitable, ce sont l'informatique et l'électronique.

Dans ces domaines, pour être proche des humains qui ne maîtrisent bien que le décimal et pour être proche en même temps des machines qui préfèrent le binaire, on utilise assez fréquemment le système « décimal codé binaire » (DCB) qui est un système à deux étages : décimal et binaire.

Les nombres sont codés par des suites de chiffres décimaux qui, eux, sont écrits en binaire, en général sur quatre bits. Le nombre 835 sera donc écrit : 1000-0011-0101. Les codes des chiffres décimaux sont :

0 : 0000 1 : 0001 2 : 0010
3 : 0011 4 : 0100 5 : 0101
6 : 0110 7 : 0111 8 : 1000
9 : 1001.

La notation DCB n'est pas très économique en espace, car, par exemple, 16 qui s'écrit 10000 en binaire doit s'écrire 00010110 en DCB. Cependant, le DCB facilite l'affichage des résultats que les humains exigent en décimal, car la conversion du DCB vers le décimal est très simple. Les calculatrices électroniques (calculettes), avant de devenir de véritables petits ordinateurs, utilisaient en général le DCB, de même que de nombreux instruments de mesure (voir d'autres informations sur le DCB sur https://en.wikipedia.org/wiki/Binary-coded_decimal).

Les systèmes de numération présentés dans le texte principal de la rubrique généralisent l'idée d'un système à deux étages et donnent les règles permettant la conversion facile d'une numération à une autre.

> On pourrait compléter le système de règles pour que la conversion soit plus rapide et par exemple ajouter la règle $x0\&\&\&y \rightarrow x\&\&0y$, qui correspond à deux applications de $r2$.

D'autres règles sont à imaginer, mais pour être certain que le système ne produit pas d'absurdité (par exemple une conversion erronée), il faut s'assurer, pour chaque règle ajoutée, que son application laisse stable l'entier représenté par la somme des composantes A et B.

Toute suite finie composée des trois symboles 0, 1 et & représente ainsi un nombre unique et les règles indiquent comment manipuler de telles séquences sans changer le nombre représenté. On a donc un système de numération mixte associant unaire et binaire.

ESPERLUETTE POUR LA BASE 3

Le système esperluette s'adapte à la base 3, avec les règles suivantes.

Règle $s1$: $\&x \rightarrow 0\&x$

Règle $s2$: $x0\&\&y \rightarrow x\&0y$

Règle $s3$: $x0\&y \rightarrow x2y$

Règle $s4$: $x0\&y \rightarrow x1y$

On utilise la couleur rouge pour les chiffres car ils désignent des chiffres de la base 3 qu'on utilisera plus loin en même temps que des chiffres de la base 2.

L'entier 11 s'écrit $9+2 = 1\times3^2+0\times3^1+2\times3^0 = 102_3$. Voyons comment s'opère la conversion avec le système esperluette de règles pour la base 3 :

$\&\&\&\&\&\&\&\&\&\&\& \rightarrow_{s1} 0\&\&\&\&\&\&\&\&\&\&\& \rightarrow_{s2} \&0\&\&\&\&\&\&\&\&\& \rightarrow_{s2} \&\&0\&\&\&\&\& \rightarrow_{s2} \&\&\&0\&\& \rightarrow_{s1} 0\&\&\&0\&\& \rightarrow_{s2} \&00\&\& \rightarrow_{s1} 0\&00\&\& \rightarrow_{s3} 0\&02 \rightarrow_{s4} 102$

Pour que la conversion fonctionne, il faut donner priorité aux règles $s1$ et $s2$ sur les autres, et donner priorité à la règle $s3$ sur la règle $s4$.

Le même type de raisonnement que pour la base 2 démontre que les règles $s1$, $s2$, $s3$ et $s4$ fonctionnent toujours de façon infaillible pour convertir de la notation unaire à la notation ternaire.

UN PREMIER SYSTÈME À DEUX ÉTAGES

L'utilisation des règles $s1$ et $s2$ est intéressante et va nous donner un premier exemple de système de numération à deux étages. Dans une première phase des transformations utilisant les règles esperluette pour la base 3, les & sont poussés le plus à droite possible. Pour notre exemple, &&&&&&&&&&&&, on aboutit à 0&00&&. La séquence obtenue quand $s2$ n'est plus utilisable se lit de la façon suivante :

- les 0 délimitent des boîtes dans lesquelles il y a plus ou moins de &, mais toujours moins de trois, car sinon on pourrait utiliser la règle $s2$.

En délimitant les boîtes plus clairement dans notre exemple, cela donne :

0 [&] 0 [ ] 0 [&&], c'est-à-dire une boîte avec un &, une boîte avec zéro & et une boîte avec deux &.

Dans chacune des boîtes, il y a, en écriture unaire, le chiffre qui correspond à l'écriture en base 3 du nombre décimal 11 : 1, 0, 2.

Ce qu'on obtient est donc une écriture de 11 dans un système à deux étages : l'un utilisant l'unaire, l'autre utilisant le ternaire. Plus loin, nous présenterons des systèmes de type esperluette aboutissant à un système de numération à deux étages, décimal et binaire.

CONVERSION DE LA BASE 2 À LA BASE 3

Les deux systèmes présentés peuvent se regrouper en un seul qui permet de convertir de la base 2 à la base 3 et inversement. Pour ce faire, on prend les règles de la base 2 et leurs inverses ($r1$, $r2$, $r3$, $r1'$, $r2'$, $r3'$), les règles de la base 3 et leurs inverses ($s1$, $s2$, $s3$, $s4$, $s1'$, $s2'$, $s3'$, $s4'$). Cela fait 14 règles. On passera de la base 2 à la base 3 en utilisant les règles de la base 2 à l'envers pour obtenir le nombre en unaire, puis les règles de la base 3 pour passer du unaire au ternaire. Bien sûr, on pourra aussi passer du ternaire au binaire avec les 14 règles.

ADDITION EN BASE MIXTE BINAIRE-UNAIRE

5

Voyons comment on peut, sans calcul compliqué et en restant toujours avec des nombres en notation mixte binaire-unaire, réaliser une addition. Prenons deux nombres écrits en base mixte binaire-unaire, 10&&&110&&&0 et 10&&1110.

On peut savoir qu'ils valent 98 et 78 en utilisant la méthode des composantes A et B *(voir le texte principal)*. Nous effectuons cette conversion juste pour contrôler, ces valeurs ne seront pas utilisées :
2 + 2 + 2 + 4 + 8 + 16 + 16 + 16 + 32 = 98
et 2 + 4 + 8 + 16 + 16 + 32 = 78 ; 98 + 78 = 176.

Pour faire l'addition tout en restant codé dans le système mixte binaire-unaire, on se débarrasse d'abord de tous les 1 en utilisant la règle $r3'$ qui permet de remplacer 1 par 0&. Cela conduit à 0&0&&&0&0&0&&&0 et 0&0&&0&0&0&0.

Cette écriture est facile à lire : les 0 délimitent des boîtes dans lesquelles les nombres sont écrits en unaire avec des &. On aligne les zéros en commençant par ceux situés le plus à droite. Cela aligne aussi les boîtes : 0-&-0-&&&-0-&-0-&-0-&&&-0 ; 0-&-0- && - 0-&-0-&-0- & -0. Il suffit alors d'additionner le contenu des boîtes, c'est-à-dire de concaténer les contenus des boîtes d'une même colonne. Pour une addition de k nombres, la méthode serait la même. Le résultat est ici : 0-&&-0-&&&&&-0-&&-0-&&-0-&&&&-0.
Avec la méthode des composantes, on contrôle qu'il s'agit bien de 176 (lecture des & de droite à gauche) :
2 + 2 + 2 + 2 + 4 + 4 + 8 + 8 + 16 + 16 + 16 + 16 + 32 + 32 = 176.

Si on le souhaite, le résultat est alors rapidement simplifié (par utilisation de $r1$, $r2$ et $r3$) et par exemple réécrit seulement avec des 0 et des 1, c'est-à-dire en binaire :
10110000 = 16 + 32 + 128 = 176.

Le système de numération associé à cette écriture utilisant les six symboles &, 0, 1, 0, 1, 2 est un système de numération triple. Il est certes un peu compliqué, mais il est remarquable que l'on puisse circuler d'une notation à une autre assez simplement avec quelques règles élémentaires. Si on le souhaitait, en introduisant d'autres couleurs et les règles nécessaires, on aurait par exemple un système de numération quadruple décimal-ternaire-binaire-unaire, etc.

POUR TOUTES LES BASES !

La généralisation du système esperluette pour la base 5 est facile à imaginer. Elle est donnée ci-dessous en utilisant la couleur verte pour les chiffres. La généralisation à une base quelconque, b, devient alors évidente.

Règle $t1$: $\&x \rightarrow 0\&x$
Règle $t2$: $x0\&\&\&\&\&y \rightarrow x\&0y$
Règle $t3$: $x0\&\&\&\&y \rightarrow x4y$
Règle $t4$: $x0\&\&\&y \rightarrow x3y$
Règle $t5$: $x0\&\&y \rightarrow x2y$
Règle $t6$: $x0\&y \rightarrow x1y$

Comme précédemment, si l'on utilise le plus possible les règles $t1$ et $t2$, on arrive à une représentation du nombre étudié dans un système à deux étages : unaire et quinternaire.

Par exemple, l'entier $39_{10} = 25_{10}+10_{10}+4_{10} = 1\times5^2+2\times5^1+4\times5^0 = 124_5$ s'écrira 0&0&&0&&&&, ce qui, en faisant apparaître les boîtes, donne :

0 [&] 0 [&&] 0 [&&&&].

De tels systèmes, ou du moins des systèmes assez proches, ont déjà été utilisés. Le système des Mayas, à peu de chose près (en remplaçant le symbole qui représente le 5 par cinq points ronds), est un système à un étage en base 20 et un étage unaire (*voir l'encadré 3*).

En informatique et en électronique, on utilise un système de ce type, le « décimal codé binaire », ou DCB, qui est un système à deux étages : un étage décimal et un étage binaire.

Pour représenter 237_{10} en DCB, on écrit 10 11 111, c'est-à-dire les trois chiffres 2, 3 et 7 successivement écrits en binaire. Dans la notation DCB, pour éviter toute confusion, il faut soit avoir réservé des espaces mémoire distincts pour chacune des écritures 10, 11 et 111, soit utiliser un séparateur (10•11•111).

On a vu que les systèmes esperluette peuvent convertir en notation à deux étages ternaire-unaire ou quinternaire-unaire, mais l'étage le plus bas est unaire, ce qui est un peu encombrant. Existe-t-il un système de règles de type esperluette qui permettraient de convertir un nombre n donné en unaire en notation à deux étages décimal-binaire (comme le décimal codé binaire) ?

La réponse est oui. C'est possible en introduisant des règles qui vont convertir le contenu des boîtes en unaire évoquées plus haut pour les écrire en binaire. Attention, ce système n'est pas exactement le même que celui qu'on utiliserait pour créer un système mixte décimal-binaire et permettre les conversions entre le décimal et le binaire.

ESPERLUETTE POUR LE DÉCIMAL CODÉ BINAIRE

Voici les règles du système esperluette pour le DCB.

Règle $u1$: $\&x \rightarrow 0\&x$
Règle $u2$: $x0\&\&\&\&\&\&\&\&\&y \rightarrow x\&0y$
Règle $u3$: $x0\&y \rightarrow x00\&y$
Règle $u4$: $x0\&\&y \rightarrow x\&0y$
Règle $u5$: $x0\&y \rightarrow x1y$
Règle $u6$: $x00y \rightarrow x000y$

L'utilisation des six règles se fera en donnant priorité aux règles $u1$ et $u2$ qui conduisent à l'écriture en décimal-unaire du nombre considéré. Ensuite, on utilisera les règles $u3$ et $u4$ qui mènent à une écriture à trois étages, décimal-binaire-unaire. Enfin, les règles $u5$ et $u6$ réduisent la séquence pour l'écrire en décimal-binaire.

Voici un exemple pour comprendre la série des transformations. Partons d'une séquence de 2307 fois le &. Après avoir appliqué autant que possible les règles $u1$ et $u2$, on arrive à 0&&0&&&00&&&&&&&&, ce qui est une représentation de 2307 en notation à deux étages décimal-unaire avec le 0 comme séparateur. L'application des règles $u3$ et $u4$ produit 00&000&0&000&0&0&, ce qui, en délimitant les boîtes, s'écrit :

0 [0&0] 0 [0&0&] 0 [ ] 0 [0&0&0&].

On voit, séparées par des 0 (noirs), une boîte 0&0, puis une autre 0&0&, puis une boîte vide et enfin une quatrième boîte 0&0&0&. Chacune de ces boîtes est elle-même une suite de boîtes contenant plus ou moins de & séparés par des 0 bleus, et on reconnaît dans la première boîte le nombre 2 en binaire-unaire. Le nombre 3 en binaire-unaire est dans la seconde. Le 0 correspond à la troisième boîte, et le nombre 7 en binaire-unaire à la dernière.

La règle $u5$ transforme alors les boîtes du second étage en binaire, ce qui aboutit à 0100110011. En introduisant des blancs et en délimitant les boîtes :
0 [10] 0 [11] 0 [ ] 0 [111], où l'on reconnaît déjà 2307.

La règle $u6$ sert à placer un 0 bleu dans les boîtes délimitées par des 0 noirs ne contenant rien. Le résultat obtenu, 0100110011, est maintenant facile à lire si l'on comprend bien que les 0 noirs sont des séparateurs, et que les chiffres en bleu représentent les entiers 2, 3, 0 et 7 écrits en binaire :

0 10 0 11 0 0 0 111.

Le système des règles a donc converti le nombre 2307 du unaire au décimal-binaire. Vous imaginez sans mal que l'on conçoit aussi des systèmes de numération à autant d'étages que l'on veut, par exemple décimal-quaternaire-ternaire-binaire. De quoi s'amuser encore un moment ! ■

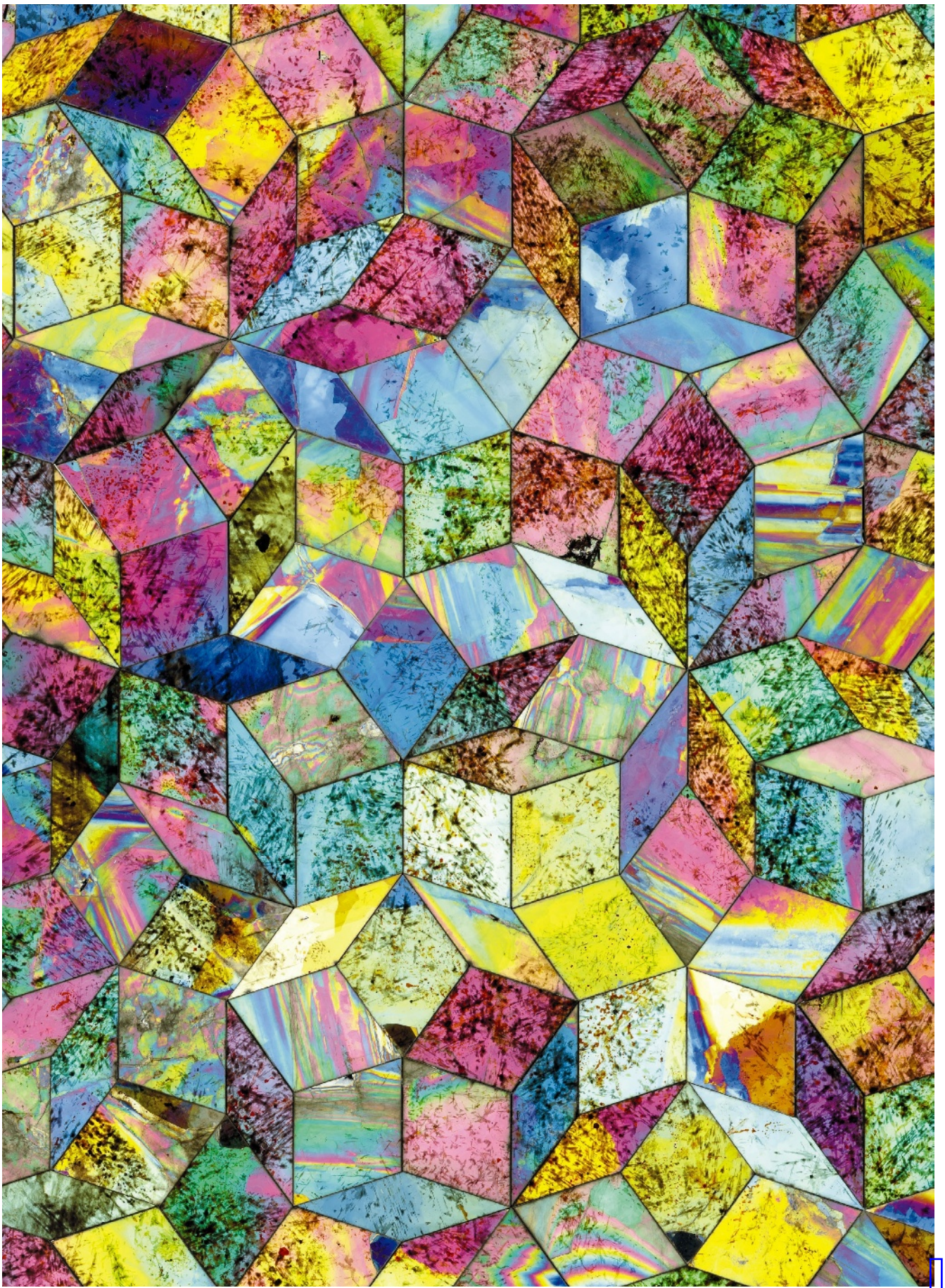
BIBLIOGRAPHIE

Wikipédia, Système de numération indo-arabe, consulté en septembre 2020.

Wikipédia, Esperluette, septembre 2020.

Wikipédia, Binary-coded decimal, septembre 2020.

Wikipédia, Numération maya, septembre 2020.



MicaPenrose, de Léa Barbazanges.

© Eric Sander

L'AUTEUR

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

UNE VIE ENTRE MICA ET CALCITE

Au domaine de Chaumont-sur-Loire, les créations minérales de Léa Barbazanges, centrées sur la notion de cristal périodique ou apériodique, rendent hommage au vivant… et à deux Prix Nobel.

La première pierre a été posée vers l'an 1000, quand Eudes 1er, comte de Blois, décide de faire ériger une forteresse sur un coteau dominant la Loire afin de surveiller les remuants voisins du comté d'Anjou. Le premier parterre du parc qui entoure le château, détruit et reconstruit au fil des siècles, est installé en 1884 par l'architecte paysagiste Henri Duchêne. Dès lors, le domaine de Chaumont-sur-Loire était prêt pour accueillir le désormais célèbre Festival international des jardins, dont la première édition s'est tenue en 1992.

Un autre rendez-vous incontournable s'y est greffé, la «Saison d'art»: chaque année, une quinzaine d'artistes et plasticiens éminents ou émergents sont invités à présenter des œuvres inédites et originales sur le thème de la nature. D'ordinaire close à la fin de l'automne, la douzième Saison d'art est exceptionnellement prolongée jusqu'au 3 janvier 2021 et reste accessible au gré des mesures de restriction sanitaire.

Des poétiques herbiers de Marinette Cueco aux délicates céramiques de Sophie Lavaux en passant par les plumes suspendues d'Isa Barbier, les yeux sont séduits par la grâce et la subtilité des univers ainsi offerts.

Et un œil qui serait en outre sensible aux charmes de la science ne manquera pas de s'arrêter sur les œuvres de Léa Barbazanges alliant minéralogie et mathématiques à l'esthétique. D'abord, dans *Cristaux*, l'artiste installée à Strasbourg donne à voir sur de grands panneaux translucides des cristaux de calcite, un carbonate de calcium ($CaCO_3$) naturel. Très abondant, ce minéral est le constituant essentiel des roches sédimentaires, des concrétions dans les grottes, ainsi que des structures élaborées par des organismes vivants microscopiques comme les foraminifères et les coccolithophores.

La calcite est dotée de caractéristiques optiques particulières avec lesquelles l'œuvre joue, notamment la biréfringence. Grâce à cette propriété de diviser en deux un rayon de lumière, les motifs de *Cristaux* se parent de reflets argentés changeants et évoquent d'autres édifices ordonnés tels que le givre ou les flocons de neige.

DE MAILLE EN MAILLE

À la fin du XVIIIe siècle, les études de la calcite menées par le minéralogiste français René Just Haüy ont conduit à la découverte du principe de la maille cristalline. Mais cette idée selon laquelle un motif géométrique simple constitue un réseau cristallin en se répétant périodiquement a été bousculée par la découverte des quasi-cristaux au début des années 1980. Il s'agit de solides aux propriétés de diffraction similaires à celles des cristaux (en l'occurrence, des diagrammes dits «discrets»), mais dont la structure n'est pas périodique. Leur identification, un temps contestée, a valu à l'Israélien Dan Shechtman le prix Nobel de chimie en 2011.

Une méthode pour modéliser ces quasi-cristaux est de recourir aux pavages de Penrose, eux aussi non périodiques et portant le nom du Britannique Roger Penrose, lauréat du prix Nobel de physique en 2020 pour ses travaux sur les trous noirs. L'un de ces pavages, faits de deux types de losanges aux angles bien définis (on parle de pavage de type 3) est le cœur de *MicaPenrose*, l'autre œuvre de Léa Barbazanges exposée à Chaumont (*voir page ci-contre*). Conçue en collaboration avec Sylvain Ravy, du Laboratoire de physique des solides de l'université Paris-Sud, elle consiste en un assemblage de tuiles faites de mica.

Ce silicate d'aluminium et de potassium (dont le cristal est périodique, à l'inverse de l'alliage d'aluminium et de manganèse étudié par Dan Shechtman) est l'un des composants du granit et du sable. Sa structure feuilletée lui confère un aspect scintillant spectaculaire et un chatoiement de couleurs semblable à celui d'une bulle de savon qui varie selon l'angle d'observation. De fait, devant l'œuvre, en se déplaçant, le visiteur voit passer le pavage d'une teinte plutôt grise et terne à une explosion multicolore.

Étonnamment, selon Helen Hansma, de l'université de Santa Barbara, en Californie, les premières cellules vivantes sont peut-être apparues au sein d'un film d'eau entre des feuillets de mica. Or Léa Barbazanges place la vie au centre de ses créations, même lorsqu'elles sont minérales. Et c'est en fait toute l'ambition du domaine de Chaumont et de son engagement pour l'art du jardin: faire surgir la vie de la terre pour l'émerveillement de tous. ■

Saison d'art 2020
www.domaine-chaumont.fr/fr

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

LES AUTEURS

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

QUAND LA NEIGE SE MÉTAMORPHOSE

Contrairement aux apparences, le manteau neigeux n'est pas un milieu homogène. Ses diverses couches, façonnées par les conditions météorologiques, présentent des structures microscopiques différentes.

L'hiver est là et les chutes de neige successives couvrent d'un manteau blanc les flancs de nos montagnes. Un manteau loin d'être homogène et immuable. En fonction des conditions atmosphériques passées et présentes (vent, température, humidité…), cette neige évolue lentement. Elle garde pour un œil non averti le même aspect visuel, mais sa microstructure évolue. La densité et les propriétés mécaniques changent, avec de possibles conséquences par exemple sur le déclenchement des avalanches. En quoi consistent ces « métamorphoses » de la neige et quels sont leurs moteurs?

Commençons par la formation d'une couche de neige. En l'absence de vent et si la température ambiante est inférieure à 0 °C au moment de la chute, les flocons, constitués de cristaux de neige agglomérés, forment sur le sol une couche peu dense, la « poudreuse ». Il est périlleux de marcher dessus, car on s'y enfonce facilement, à cause de sa faible résistance mécanique. Tout de même, la neige fraîche et sèche a une certaine cohésion. Les flocons, avec leurs branches et leurs formes compliquées, s'enchevêtrent tandis que de nombreux petits ponts de glace se forment au niveau des points de contact. Cette neige tient ainsi facilement sur les pentes, les toits, les branches des arbres…

DES CRISTAUX QUI DEVIENNENT DES GRAINS

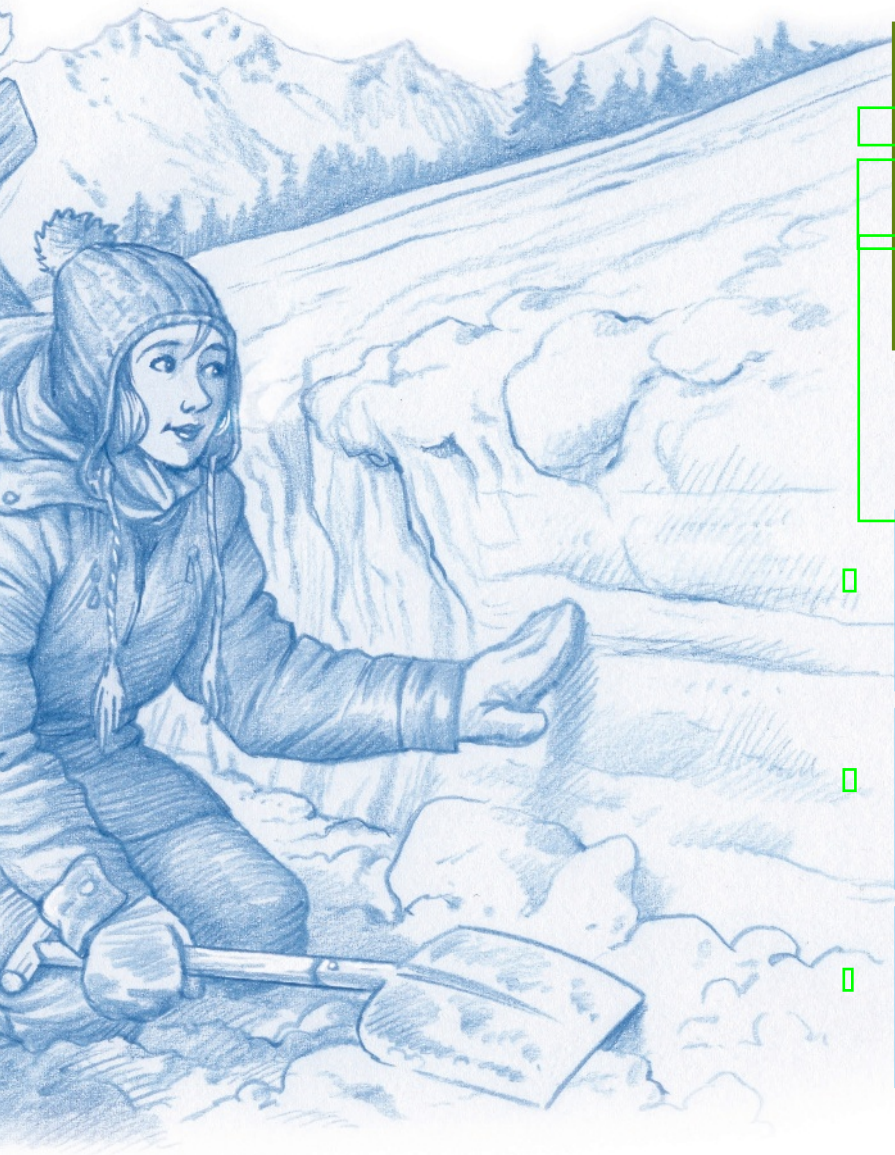
Et ensuite? Sous l'effet du vent ou juste du poids de la couche, les flocons se brisent. Leurs aspérités s'adoucissent: de cristaux géométriques, on passe à des fragments, moins enchevêtrés, puis, parfois au bout de plusieurs semaines, à des petits grains d'une fraction de millimètre et sans beaucoup d'aspérités.

Entre le sol et la surface de la couverture neigeuse, la neige présente en général plusieurs couches, que l'œil ne distingue que difficilement.

Dans un premier temps, la perte des enchevêtrements réduit la cohésion de la neige, qui peut alors glisser des supports les plus pentus. Mais, plus tard, les grains débarrassés de leurs aspérités peuvent s'approcher davantage et mieux s'empiler. La neige se tasse alors, devenant plus dense et regagnant de la cohésion.

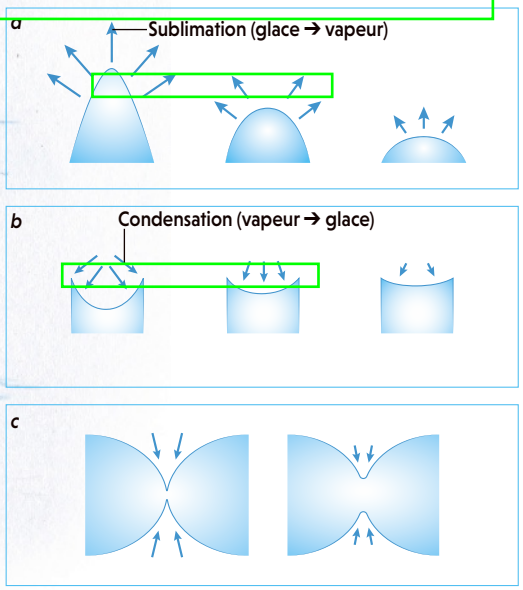
Que se passe-t-il, plus précisément, lors de ces transformations? La neige est de l'eau à l'état solide – de la glace. En dessous de 0 °C, la glace se sublime en vapeur tant que la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air ambiant est inférieure à une quantité maximale, qui dépend de la température. Une fois ce maximum atteint, la glace est à l'équilibre avec la vapeur d'eau et tout surplus de vapeur se condense.

© Illustrations de Bruno Vacaro



LISSAGE DES ASPÉRITÉS

À température fixée, l'air en contact avec de la glace d'eau peut se charger en vapeur d'eau jusqu'à une certaine teneur maximale. Tant que ce maximum n'est pas atteint, il y a sublimation de la glace en vapeur. Au-delà, c'est l'inverse : de la vapeur d'eau se solidifie en glace. La courbure de la glace modifie le maximum en question, qui est réduit pour une surface convexe (une bosse), et augmenté pour une surface concave (un creux). Il s'ensuit qu'au contact avec de l'air saturé en vapeur d'eau, une bosse de glace s'aplanit peu à peu par sublimation *(a)*, tandis qu'un creux s'aplanit par solidification de vapeur *(b)*. Aux points de contact entre deux grains de glace la surface est très concave : cette concavité tend à se combler, et donc le « pont » de glace s'agrandit *(c)*.



Cependant, ce maximum de la teneur en vapeur d'eau dépend de la forme géométrique de la glace. L'existence d'une tension de surface, même pour un solide, tend à diminuer la surface du matériau. Or la sublimation de glace en vapeur réduit la surface d'une partie convexe en la faisant maigrir, mais augmente la surface d'une partie concave en la creusant. La sublimation est donc favorisée au niveau des bosses et pointes, et défavorisée dans les creux.

Conséquence: la teneur maximale en vapeur d'eau de l'air est plus élevée près des parties convexes de la glace et plus faible près des parties concaves, par rapport à une surface plane. L'effet n'est manifeste que pour des courbures importantes (il est d'environ 10% pour des sphérules de glace de 0,1 micromètre de rayon, mais vaut seulement 1% pour un rayon de 1 micromètre).

Ce déséquilibre se traduit par un flux de vapeur, allant du voisinage des bosses, qui se subliment pour compenser le déficit en vapeur de l'air ambiant, vers le voisinage des creux, qui se comblent par la condensation de la vapeur devenue excédentaire (*voir l'encadré ci-dessus*). Par conséquent, les cristaux de neige perdent leurs aspérités, leurs aiguilles, leurs creux, et à terme leurs tailles s'uniformisent. Cela favorise le tassement de la neige.

Par ailleurs, les points de contact entre ces grains constituent des parties concaves, qui tendent donc à se combler. Ainsi, les ponts de glace entre les grains grossissent, d'où une cohésion supplémentaire. On obtient finalement une neige compacte, qui se tient mais qui reste facile à découper (pour faire par exemple des boules de neige), les fractures se propageant bien dans cette matière peu élastique.

Les métamorphoses ne s'arrêtent pas là, car des différences de températures peuvent apparaître dans la couche de neige et provoquer de nouveaux déséquilibres thermodynamiques.

VARIATIONS SPATIALES DE LA TEMPÉRATURE, HUMIDITÉ

En moyenne montagne, où les neiges ne sont pas éternelles, les premières chutes de neige recouvrent un sol à peine gelé, dont la température avoisine souvent 0 °C. Mais à mesure que le manteau neigeux s'épaissit, les transferts thermiques y étant lents (la neige est un bon isolant thermique), il peut apparaître des >

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

> variations de température notables entre la neige au contact du sol et celle de la surface du manteau, plus froide.

Or la teneur maximale en vapeur d'eau de l'air à l'équilibre avec la glace varie beaucoup avec la température. Elle est par exemple de 4,8 grammes par mètre cube (g/m³) à 0 °C, mais de 3,3 g/m³ à – 5 °C, et de 2,2 g/m³ à – 10 °C. Dans ces conditions, on observe un flux de vapeur depuis les couches les moins froides, où les grains de glace se subliment, vers les couches les plus froides, où l'excès de vapeur se condense sur les grains.

Cet effet l'emporte sur le précédent dès que les variations de température dépassent 5 °C par mètre. Il se manifeste par l'apparition de nouvelles microstructures. Pourquoi? Les variations de température ayant lieu dans la direction perpendiculaire au sol, chaque grain subit à la fois une sublimation et une condensation. La partie du grain la plus proche de la surface tend à se sublimer au profit des grains au-dessus de lui, plus froids, tandis que la partie du grain la plus proche du sol condense la vapeur qui afflue des grains du dessous, plus chauds.

MINIPYRAMIDES À GRADINS

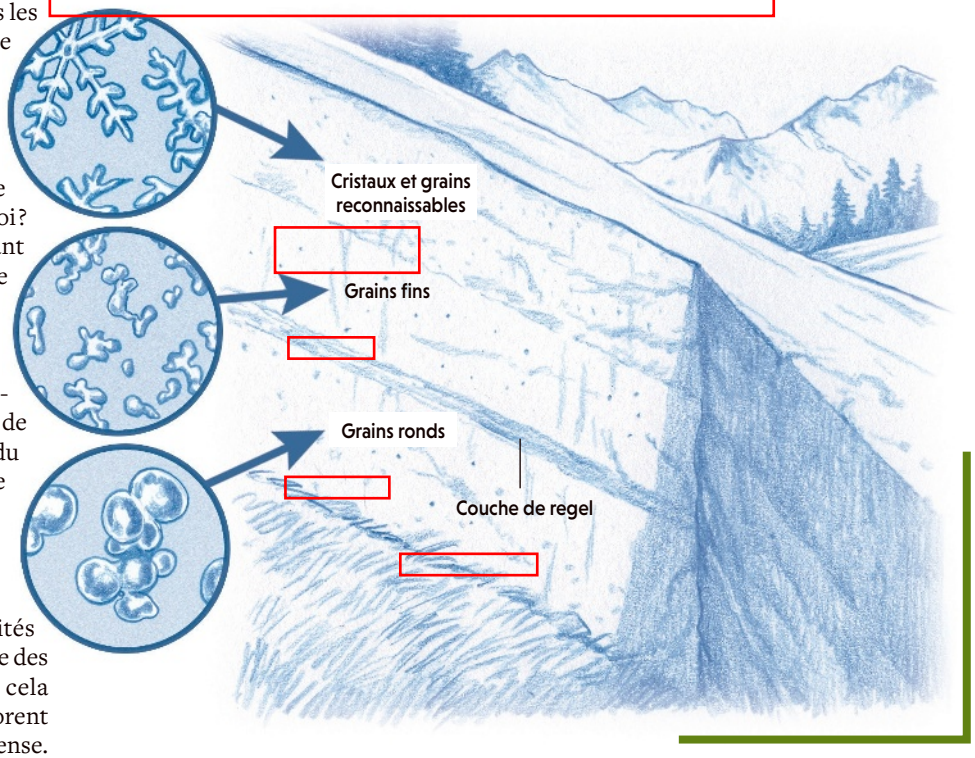
Cela fait disparaître les aspérités comme précédemment, mais à cause des flux de vapeur plus importants, cela conduit aussi à des grains qui arborent des facettes là où la vapeur se condense. Quand les variations de température dépassent 20 °C par mètre, on obtient par ce mécanisme d'assez gros grains, d'environ 1 millimètre, en forme de pyramide maya avec une base plate, des gradins et un sommet arrondi. Cette neige appelée «givre de profondeur» se reconnaît aisément car elle coule très facilement, comme du gros sel, les grains ne présentant guère de cohésion entre eux.

Enfin, le manteau neigeux est aussi susceptible d'évoluer en fonction de l'humidité, eau sous forme liquide due par exemple à la pluie ou à la fonte superficielle de la surface sous les rayons du soleil. Si elle persiste, c'est que la température du manteau neigeux qu'elle imbibe est à 0 °C.

Lorsque la teneur en eau est faible, elle se loge entre les grains et forme des ménisques qui renforcent beaucoup la cohésion des grains, par attraction capillaire. La présence de ces ménisques provoque aussi, par modification de la température de fusion, la fonte des petits grains ou des parties convexes.

DES COUCHES DE MICROSTRUCTURES DIFFÉRENTES

Les différentes couches d'un manteau neigeux se distinguent par leur structure à l'échelle submillimétrique. Un exemple de stratification est illustré ci-dessous, avec les formes approximatives des cristaux ou grains de glace qui caractérisent chaque couche.



Lorsque la teneur en eau augmente, on obtient une neige constituée de grains ronds dont la cohésion diminue: elle devient alors molle et dense, propice à la glisse. En cas de regel, si l'eau est assez abondante, la neige forme une croûte de glace très dure.

Ainsi, dès que le manteau neigeux est épais, il peut présenter plusieurs strates de microstructures différentes, en fonction des dépôts neigeux et des conditions climatiques au cours des mois précédents. Il est donc difficile d'estimer sa tenue par un simple examen de sa surface. La présence d'une couche de givre de profondeur constitue par exemple un véritable danger, car la neige peut soudainement se mettre à couler et provoquer une avalanche. C'est pourquoi les sondages stratigraphiques, sur toute l'épaisseur du manteau neigeux, sont indispensables pour estimer la cohésion des différentes couches et le risque d'avalanche. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Calonne *et al.*, Modélisation des métamorphoses de la neige sèche : de la microstructure à la couche de neige, *La Météorologie*, n° 98, pp. 36-44, août 2017.

C. Sergent, **Les métamorphoses de la neige,** *Neige et Avalanches* (revue de l'Anena), n° 83, pp. 2-10, septembre 1998.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

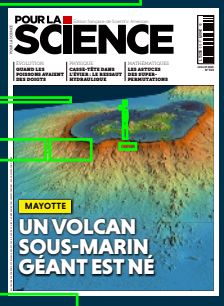
N° 518 (Déc. 20)
réf. PL518

N° 517 (Nov. 20)
réf. PL517

N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516

N° 515 (sept. 20)
réf. PL515

N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513

N° 512 (juin 20)
réf. PL512

N° 511 (mai 20)
réf. PL511

N° 510 (avril 20)
réf. PL510

N° 509 (mars 20)
réf. PL509

N° 508 (fév. 20)
réf. PL508

N° 507 (jan 20)
réf. PL507

À retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75 014 Paris – email : boutique@pourlascience.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 :

1re réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
2e réf. ..... x 9,90 € = ... €
3e réf. ..... x 9,90 € = ... €
4e réf. ..... x 9,90 € = ... €
5e réf. ..... x 9,90 € = ... €
6e réf. ..... x 9,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

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 :

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 31/12/2021 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.

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

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

COMMENT LES THÉROPODES PERDENT LEURS DOIGTS

La découverte d'«Oksoko avarsan», un dinosaure proche parent des oiseaux muni de seulement deux doigts fonctionnels, ravive la question de la perte des doigts chez les dinosaures théropodes.

À la fin du Crétacé, il y a environ 70 millions d'années, loin d'être un désert, l'actuel Gobi, en Mongolie, arborait cours d'eau, lacs et denses forêts de conifères, et était peuplé d'une étonnante diversité de dinosaures, en particulier d'oviraptorosaures. Ces théropodes bipèdes sont les plus proches parents des paraves, les oiseaux au sens large (dont le vélociraptor), parmi lesquels les oiseaux (aves) sont les seuls théropodes actuels. C'est ce qui fait l'intérêt exceptionnel des oviraptorosaures. De fait, depuis une vingtaine d'années, de nombreuses découvertes de fossiles remarquablement conservés de ces animaux ont permis aux paléontologues de brosser la dynamique évolutive de la transition de théropodes terrestres à des théropodes volants: origine des plumes, changement du squelette et de la musculature et... réduction du nombre de doigts.

La réduction du nombre de doigts du membre antérieur des théropodes est bien connue: de cinq doigts, comme chez les crocodiles, on passe à quatre, puis à trois, comme chez les oiseaux actuels. Une telle perte est adaptative, car elle réduit la masse de l'extrémité du membre et, par conséquent, son moment d'inertie, ce qui facilite le vol, la surface alaire étant réalisée par des plumes très légères. Toutefois, on est encore loin de comprendre comment cette perte s'est produite. La découverte d'un nouvel oviraptorosaure, nommé *Oksoko avarsan*, dans la couche géologique du Crétacé terminal de Mongolie vient cependant de raviver cette question.

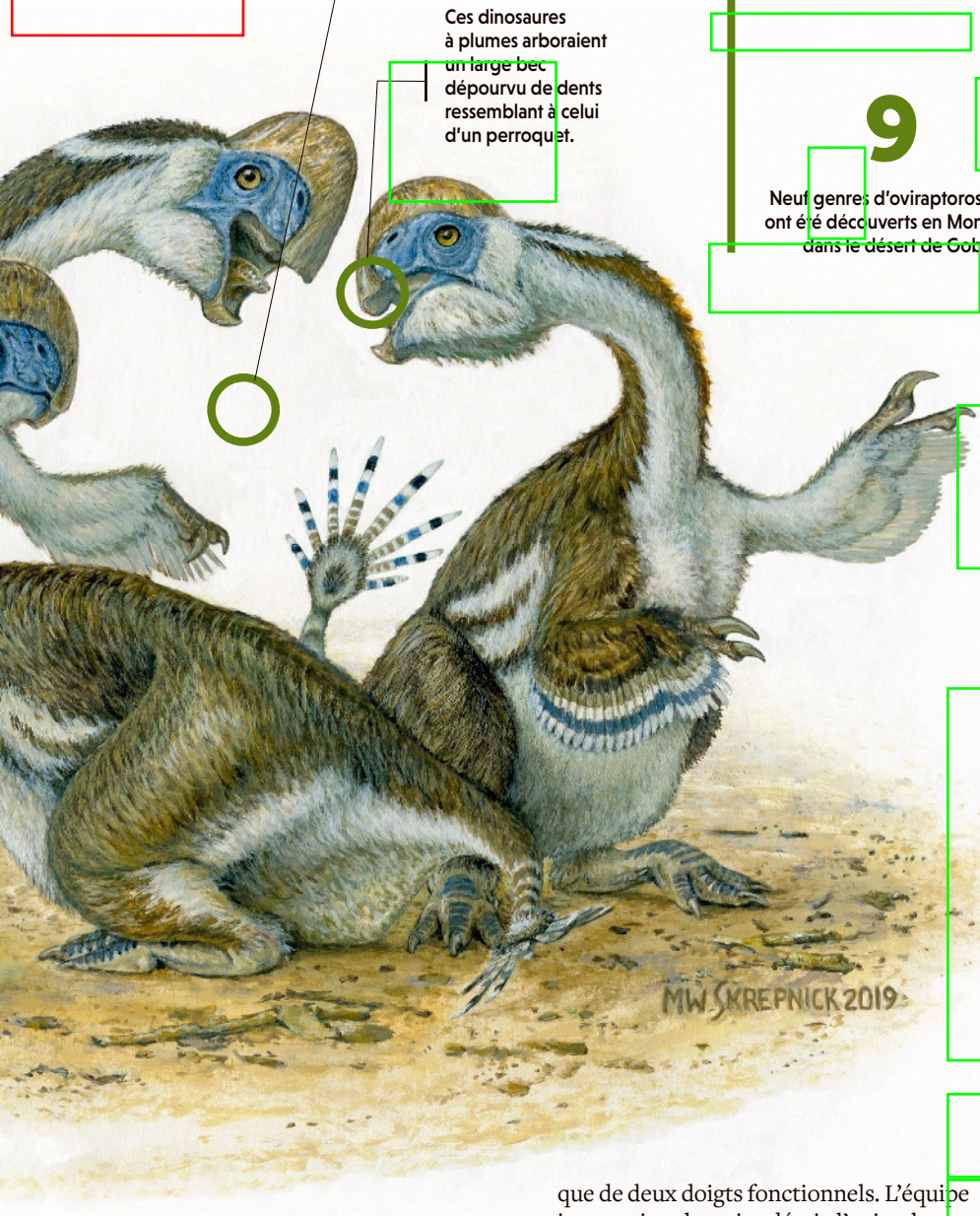
La main de l'animal présente en effet une originalité: elle n'a plus que deux doigts fonctionnels, munis de griffes, avec un troisième doigt vestigial. Le clade des oviraptorosaures est très diversifié, et les animaux montrent une grande variété dans la longueur et la morphologie du membre antérieur, ce qui suggère des variations dans sa fonction: fourrageage, couvaison, parade... Mais *O. avarsan* est le seul connu dont ce membre n'est muni

Le terme *Oksoko* se réfère à l'aigle à trois têtes de la mythologie altaïque. Le mot *avarsan*, lui, signifie «sauvé» en mongol et rappelle que ces trois spécimens ont été confisqués à des contrebandiers par l'Agence de renseignements mongole avant d'être confiés au Centre de paléontologie mongol en 2006. Alors seulement leur étude a pu commencer...

Hervé Le Guyader a récemment publié: **Biodiversité, le pari de l'espoir,** (Le Pommier, 2020).

Exhumés ensemble, les trois spécimens juvéniles qui ont permis de décrire cette nouvelle espèce vivaient en Mongolie il y a plus de 68 millions d'années.

Ces dinosaures à plumes arboraient un large bec dépourvu de dents ressemblant à celui d'un perroquet.



EN CHIFFRES

9

Neuf genres d'oviraptorosaures ont été découverts en Mongolie, dans le désert de Gobi.

175 MILLIONS D'ANNÉES

C'est l'âge de l'ancêtre commun le plus récent entre les oviraptorosaures et les paraves, les oiseaux au sens large.

2

Si l'autruche a trois doigts à son aile, elle n'en a que deux à sa patte postérieure. En revanche, l'émeu, un autre oiseau coureur, n'a qu'un doigt à l'aile et trois à la patte postérieure. Quant au crocodile du Nil, s'il a cinq doigts à sa patte antérieure, il n'en a que quatre à sa patte postérieure…

que de deux doigts fonctionnels. L'équipe internationale qui a décrit l'animal, rassemblée autour de Philip Currie, de l'université de l'Alberta, au Canada, évoque une nouvelle niche écologique pour cet animal, ce qui suggère une sélection. La comparaison avec d'autres théropodes, en tenant compte également du crâne et du bec, a amené ces chercheurs à suggérer qu'*O. avarsan* était strictement herbivore, ce qui rendait les griffes moins indispensables, d'où la perte d'un doigt. Mais comment aller plus loin sans connaître avec précision la fonction d'un tel membre ? En s'intéressant… aux oiseaux eux-mêmes.

L'intérêt des oiseaux est multiple. On y rencontre des cas de perte de doigts, dont la fonction peut être décrite. L'embryologie complète l'étude anatomique du membre et l'on connaît même des gènes clés de leur développement. C'est ainsi qu'en 2013, l'équipe de Michael Richardson, de l'université de Leyde, aux Pays-Bas, a mené une étude approfondie sur cinq oiseaux – deux oiseaux coureurs, l'émeu d'Australie et l'autruche d'Afrique, et trois oiseaux volants, le poulet, la tourterelle rieuse et le diamant mandarin – et un cousin des dinosaures, le crocodile du Nil, comme référence (*voir l'encadré page 94*).

L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉMEU, L'AUTRUCHE ET LE DIAMANT MANDARIN

Le crocodile a cinq doigts à la patte antérieure, l'émeu un seul et les autres trois. On peut s'étonner de la différence entre l'autruche et l'émeu (rappelons qu'ils avaient des ancêtres volants). Or si ce dernier n'utilise ses ailes que pour la régulation thermique en les agitant comme un éventail, l'autruche s'en sert aussi lors des parades nuptiales, pour la couvaison et comme stabilisateurs dans des manœuvres en pleine course, telles que des zigzags ou des freinages rapides. Une sélection forte s'applique donc sur de telles ailes, à la différence de celles de l'émeu, et empêche ainsi leur atrophie.

L'équipe a eu l'idée de comparer le squelette de l'adulte avec un stade précoce de développement, quand la main n'est encore qu'une palette où l'on distingue les ébauches cartilagineuses des doigts, mais aussi l'expression de certains >

Oksoko avarsan
Taille : env. 1,20 m
(env. 2 m à l'âge adulte)
Poids : env. 45 kg
(env. 74 kg à l'âge adulte)

© En haut : Michael W. Skrepnick ; en bas : G. F. Funston et al., R. Soc. Open Sci., vol. 7, article 201184, 2020 (CC BY 4.0)

> gènes de développement, tel le gène *Sox9*, dont le produit contrôle l'expression spécifique du gène de collagène de type II dans les chondrocytes, les cellules du cartilage. Seules les cellules exprimant *Sox9* produisent cette protéine. L'équipe a ainsi découvert que le plan de la main de l'embryon est bien plus complet que celui de l'adulte. Prenons le cas de l'aile de l'autruche. On distingue non pas trois ébauches cartilagineuses exprimant *Sox9*, mais cinq. Puis les ébauches des doigts I (le pouce, ou doigt le plus antérieur) et V (le plus postérieur) régressent, et seules les ébauches II, III et IV iront à terme. En d'autres termes, l'expression de *Sox9* peut persister alors que les doigts correspondants sont perdus.

Focalisons-nous sur les doigts V et I. Tous les oiseaux adultes ont perdu le doigt V. Néanmoins, tous les embryons développent, à sa position, une ébauche transitoire exprimant *Sox9*, qui évolue en cartilage. Cela est également vrai pour le membre postérieur, et, si l'on se réfère à la phylogénie et la paléontologie, les voies génétiques du développement du cartilage du doigt V ont persisté pendant plus de 25 millions d'années après que le doigt V a disparu de la patte postérieure. Le doigt I, lui, a disparu de toutes les ailes depuis 120 millions d'années. Mais les voies génétiques sous-jacentes parfois aussi, et ce dans deux lignées indépendantes (les oiseaux coureurs et les oiseaux volants). Comment expliquer une telle différence?

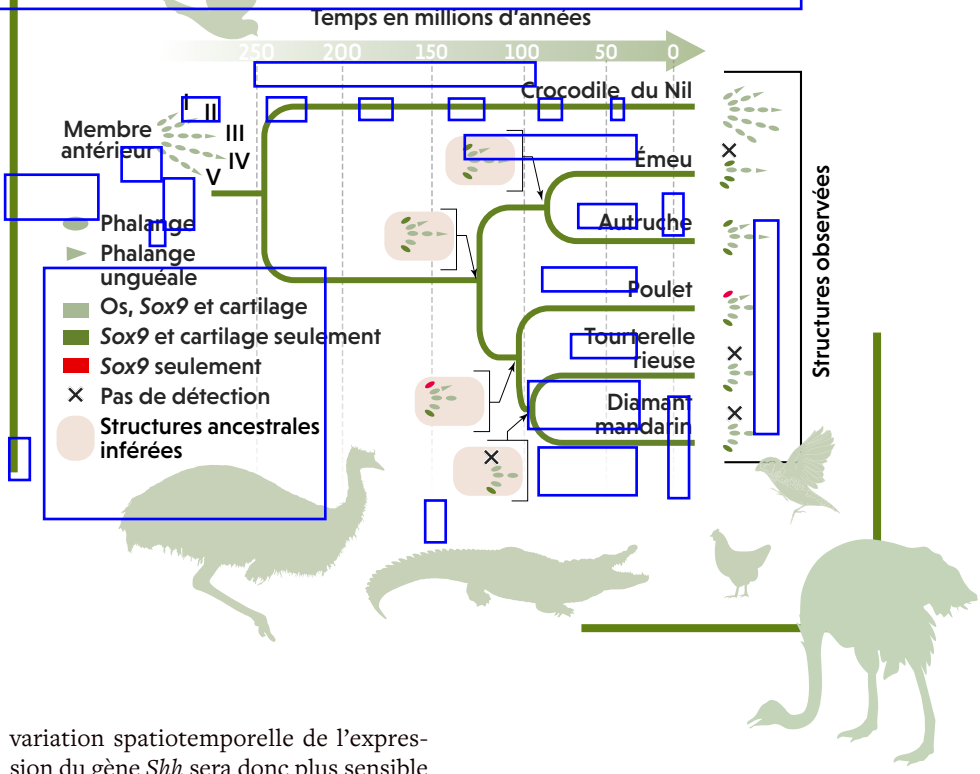
UNE CONTRAINTE DÉVELOPPEMENTALE

D'un point de vue embryologique, les doigts I et V ne sont pas en situation identique. En effet, le bourgeon du membre présente, dans sa partie postérieure, une aire appelée «zone d'activité polarisante» ou ZPA, qui envoie les signaux permettant à ce dernier de se développer suivant un axe antéropostérieur. Ainsi, le doigt V est proche de la ZPA, le doigt I en est le plus éloigné. Or la ZPA exprime le gène *Shh*, dont le produit est une protéine «morphogène»: elle diffuse dans les tissus et, selon sa concentration, active des cellules en activant *Sox9*. Cette voie est très conservée, l'évolution ne jouant que sur le caractère spatiotemporel de l'expression. Or, par diffusion, la protéine se retrouve en grande concentration près de la ZPA, donc vers le doigt V, et en faible concentration dans la partie antérieure du bourgeon, où seront situées les ébauches des doigts I et II. Une légère variation spatiotemporelle de l'expression du gène *Shh* sera donc plus sensible dans les endroits les plus éloignés de la ZPA. En d'autres termes, les contraintes développementales ne sont pas les mêmes pour une ébauche proche ou éloignée de la ZPA.

Ainsi, la disparition des doigts des oiseaux se fait suivant deux pressions: une contrainte développementale et une sélection liée aux fonctions. Il est vraisemblable que la disparition du doigt chez *O. avarsan* relève d'un scénario analogue. En effet, on peut postuler que la pression de sélection sur les pattes antérieures se relâche, étant donné que la présence de doigts griffus ne paraît plus indispensable pour un animal qui n'a plus de proies à saisir. Mais est-ce le même mécanisme que celui décrit pour les oiseaux? Vu la proximité évolutive des animaux, un biologiste postulera une identité des mécanismes évolutifs, ce qu'on appelle «un parallélisme». Mais comment le démontrer? Nous touchons la limite de la paléontologie. ■

QUAND LES DOIGTS DES OISEAUX ONT DISPARU

En combinant observations, phylogénie et paléontologie, l'équipe de Michael Richardson a reconstitué l'évolution des pertes de doigts de l'aile. Tous les oiseaux adultes ont perdu le doigt V, mais leurs embryons *(ci-dessous la structure des mains au stade final du développement)* en développent une ébauche transitoire exprimant le gène *Sox9* et produisant du cartilage. Le doigt I, lui, est représenté par un cartilage diffus chez l'autruche et une faible expression de *Sox9* chez le poulet. Aucune trace en revanche chez l'émeu, la tourterelle et le diamant mandarin.



BIBLIOGRAPHIE

G. F. Funston *et al.*, **A new two-fingered dinosaur sheds light on the radiation of Oviraptorosauria**, *R. Soc. Open Sci.*, vol. 7(10), article 201184, 2020.

K. Kawahata *et al.*, **Evolution of the avian digital pattern**, *Scientific Reports*, vol. 9, article 8560, 2019.

M. A. G. de Bakker *et al.*, **Digit loss in archosaur evolution and the interplay between selection and constraints**, *Nature*, vol. 500, pp. 445-448, 2013.

© Shutterstock.com ; Pour la Science, d'après M. de Bakker et al., Nature, vol. 500, pp. 445-448, 2013

POUR LA SCIENCE
THEMA

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

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

3,99 €

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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi

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

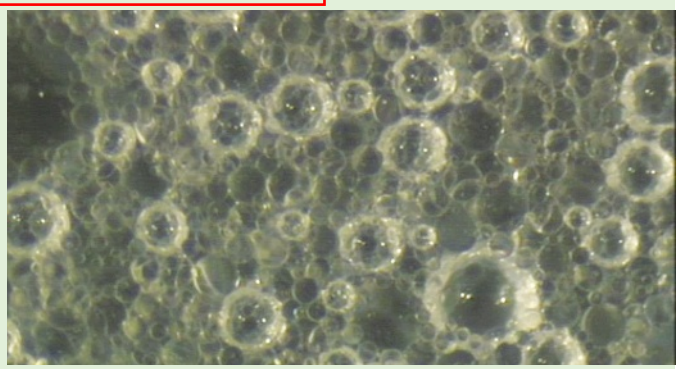
boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

L'AUTEUR

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

VARIATIONS SUR MOUSSES EN BULLE MAJEURE

Au lieu de subir le résultat des actions culinaires, soyons plus créatifs en choisissant les tailles des particules d'une suspension ou des bulles d'une mousse, leur consistance, la viscosité du liquide utilisé…



Dans cette mousse, les bulles d'air ont différentes tailles. Le diamètre des plus grosses est ici de 0,01 millimètre. La répartition en tailles des bulles d'une mousse alimentaire a une influence sur la perception en bouche.

La cuisine est restée rustique. On continue de préparer des mets comme au Moyen Âge (les sauces rémoulades, les boudins…), ou même comme bien avant: les rôtis et les bouillons datent presque de l'introduction du feu! Faisons progresser l'art culinaire en y introduisant plus de précision et en adaptant l'activité culinaire à nos objectifs. Les recettes de cuisine ne mentionnent pas d'objectif et se contentent d'indiquer un protocole que l'on est censé suivre à la lettre, avec le risque de ne jamais pouvoir se rattraper en cas de problème. Or les problèmes sont nombreux, tant les ingrédients classiques (fruits, légumes, farines, etc.) sont variables selon les lots, les saisons…

Considérons par exemple une simple mousse. La photographie ci-contre est celle d'une mousse produite par des techniques de microfluidique et qui présente de grosses bulles d'air entourées de petites bulles d'air satellites. On peut se demander si la texture de cette mousse est différente de celle d'une mousse dite «monodisperse», dont toutes les bulles seraient de la même taille. Si l'on cuit cette mousse comme une meringue, aurons-nous des objets d'un type culinaire nouveau? Je vous invite à faire l'expérience, en mêlant deux mousses de blanc en neige, l'une sucrée (petites bulles), et l'autre pas (grosses bulles).

On peut faire le même type d'observations pour des «suspensions», qui sont le thème du neuvième concours international de «cuisine note à note». Par suspension, on entend une dispersion, classiquement aléatoire, de particules solides, dans un liquide pour les suspensions liquides, et dans un solide pour les suspensions solides (pensons à du nougat, avec des éclats d'amande dans un caramel). Là encore, la pratique est généralement très rudimentaire, puisque les systèmes colloïdaux classiques s'obtiennent par un mélange sans précaution (dans une mayonnaise, les gouttes d'huile dont dispersées de façon aléatoire). Pour des breuvages épaissis, tels les frappés aux fruits, on peut faire mieux que simplement broyer ces derniers: pourquoi ne pas séparer les fibres (de la cellulose, principalement), puis les remettre après en avoir broyé la moitié dans un moulin à café, afin d'en obtenir de plus petites?

On peut aussi jouer sur la consistance des objets dispersés. On sait que des particules solides sont perceptibles en bouche quand leur diamètre dépasse une quinzaine de micromètres. Mais cette limite ne vaut plus quand les objets sont plus mous, comme pour la purée de pomme, où l'on disperse des agrégats de cellules, des cellules ou des cellules ouvertes et vidées de leur contenu: on ne perçoit alors que des particules bien plus grosses.

En outre, les études du chocolat, par exemple, ont montré que, pour des systèmes complexes, la répartition en tailles des particules dispersées est un facteur clé. Bien sûr, ce sont les particules les plus grosses que l'on perçoit le mieux, mais, quand des particules de différentes tailles sont présentes en suspension, ce sont les 10% des particules les plus grosses qui sont le mieux corrélées avec la perception sensorielle, comme l'ont récemment montré Heather Shewan, de l'université du Queensland, et deux collègues (*Food Hydrocolloids*, vol. 103, 105662, 2020).

Pour cette perception du granuleux, la concentration des particules est également importante, tout comme la viscosité de la phase liquide dispersante. Un liquide visqueux masque en effet ce granuleux, dont il s'ensuit une libération prolongée des composés qui se dissoudront dans la salive, quand les solides dispersés sont hydrosolubles.

Répartition en tailles et consistance des particules dispersées, viscosité du liquide dispersant: autant de facteurs qui, maîtrisés, détermineront le goût du mets. ■

LA RECETTE

❶ À l'extracteur de jus, préparer un jus de carottes. Y ajouter de la vitamine C.

❷ Stocker au frais.

❸ Récupérer le résidu solide, constitué essentiellement de fibres de cellulose, et le mettre à four très doux (60 °C, par exemple) pour le sécher.

❹ Passer la moitié de ces fibres sèches au moulin à café, afin d'obtenir une poudre très fine.

❺ Puis mettre les deux moitiés, non broyées et broyées, dans le jus de carotte. Mélanger et servir.

© Hervé This

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 109 (nov. 20)
réf. DO109

N° 108 (sept. 20)
réf. DO108

N° 107 (mai 20)
réf. DO107

N° 106 (févr. 20)
réf. DO106

N° 105 (nov. 19)
réf. DO105

N° 104 (juil. 19)
réf. DO104

N° 103 (avr. 19)
réf. DO103

N° 102 (fév. 19)
réf. DO102

N° 101 (nov. 18)
réf. DO101

N° 100 (août 18)
réf. DO100

N° 99 (mai 18)
réf. DO099

N° 98 (févr. 18)
réf. DO098

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML**

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science – Service marketing
170 bis Boulevard du Montparnasse – 75014 Paris – email : boutique@pourlascience.fr

☑ **OUI**, je commande des numéros de **Pour la Science Hors-série**, au tarif unitaire de 10,90 €.

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

1re réf. 0 1 x 10,90 € = 1 0 9 0 €
2e réf. ..... x 10,90 € = ... €
3e réf. ..... x 10,90 € = ... €
4e réf. ..... x 10,90 € = ... €
5e réf. ..... x 10,90 € = ... €
6e réf. ..... x 10,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

Offre valable jusqu'au 31/12/21 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter **boutique.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 :

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

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

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

P.92

UN DOIGT

Chez les théropodes, dont les oiseaux sont les seuls représentants actuels, on observe une réduction du nombre de doigts du membre antérieur. Cette perte est adaptative, car elle réduit la masse du membre et facilite ainsi le vol. De cinq, on passe à quatre, puis à trois, comme chez la plupart des oiseaux actuels… voire moins : l'émeu, qui avait des ancêtres volants, n'a plus qu'un doigt !

P.42

421

La composition du cannabis varie, autant que celle de n'importe quelle plante, selon l'environnement et la souche. On en extrait ainsi jusqu'à 421 composés chimiques, dont 61 sont des cannabinoïdes.

P.22

« Loin d'être futile, la cosmétique est une arme puissante susceptible de consolider ou de retirer toute crédibilité politique »

VIRGINIE TOURNAY
chercheuse au Cevipof

P.6

80 %

On estime qu'environ 80 % des personnes atteintes du Covid-19 souffrent de troubles de l'odorat. Nombre d'entre elles souffrent aussi d'une perturbation du goût, voire d'une perte totale de ce sens.

P.88

GIVRE DE PROFONDEUR

Quand, dans le manteau neigeux, les variations de température entre la neige en surface et celle au contact du sol dépassent 20 °C par mètre, des grains d'environ 1 millimètre en forme de pyramide maya apparaissent. Ce « givre de profondeur » coule très facilement, comme du gros sel, ce qui le rend dangereux, car susceptible de provoquer une avalanche.

P.54

1 000 KM³

Il y a 640 000 ans, la chambre magmatique sous l'actuel parc de Yellowstone, aux États-Unis, s'est vidangée. Elle a émis 1 000 kilomètres cubes de lave et a recouvert de cendres la moitié de l'Amérique du Nord. La dépression créée à la suite de son effondrement mesurait 45 kilomètres de large pour 85 kilomètres de long.

P.34

MAFIEUX

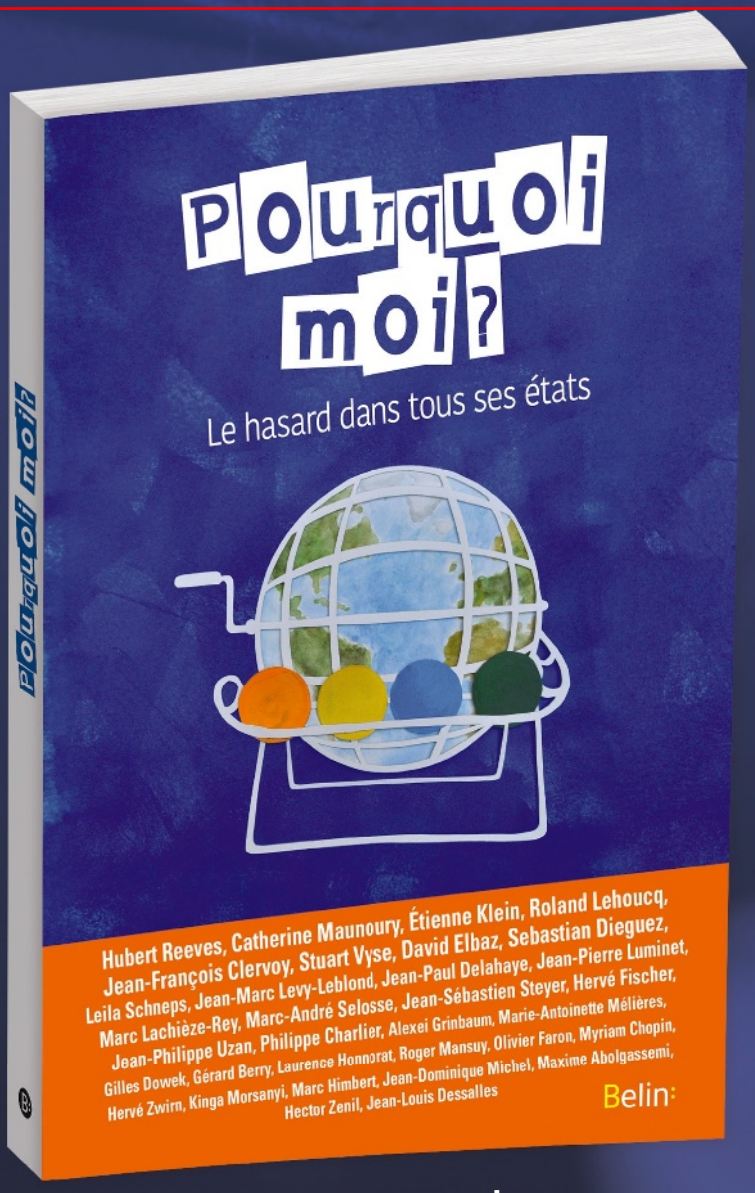
Le coucou gris, qui parasite le nid de la pie, a un comportement mafieux avec elle. Si la pie expulse l'œuf intrus, le coucou détruit tous les œufs du nid. Il est plus rentable pour la pie d'accepter l'œuf parasite que de s'en débarrasser : c'est sa seule chance de voir naître sa propre progéniture.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal : 5636 – Janvier 2021 – N° d'édition : M077059-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 250 367 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

LE HASARD

enfin décrypté

en 30 questions !

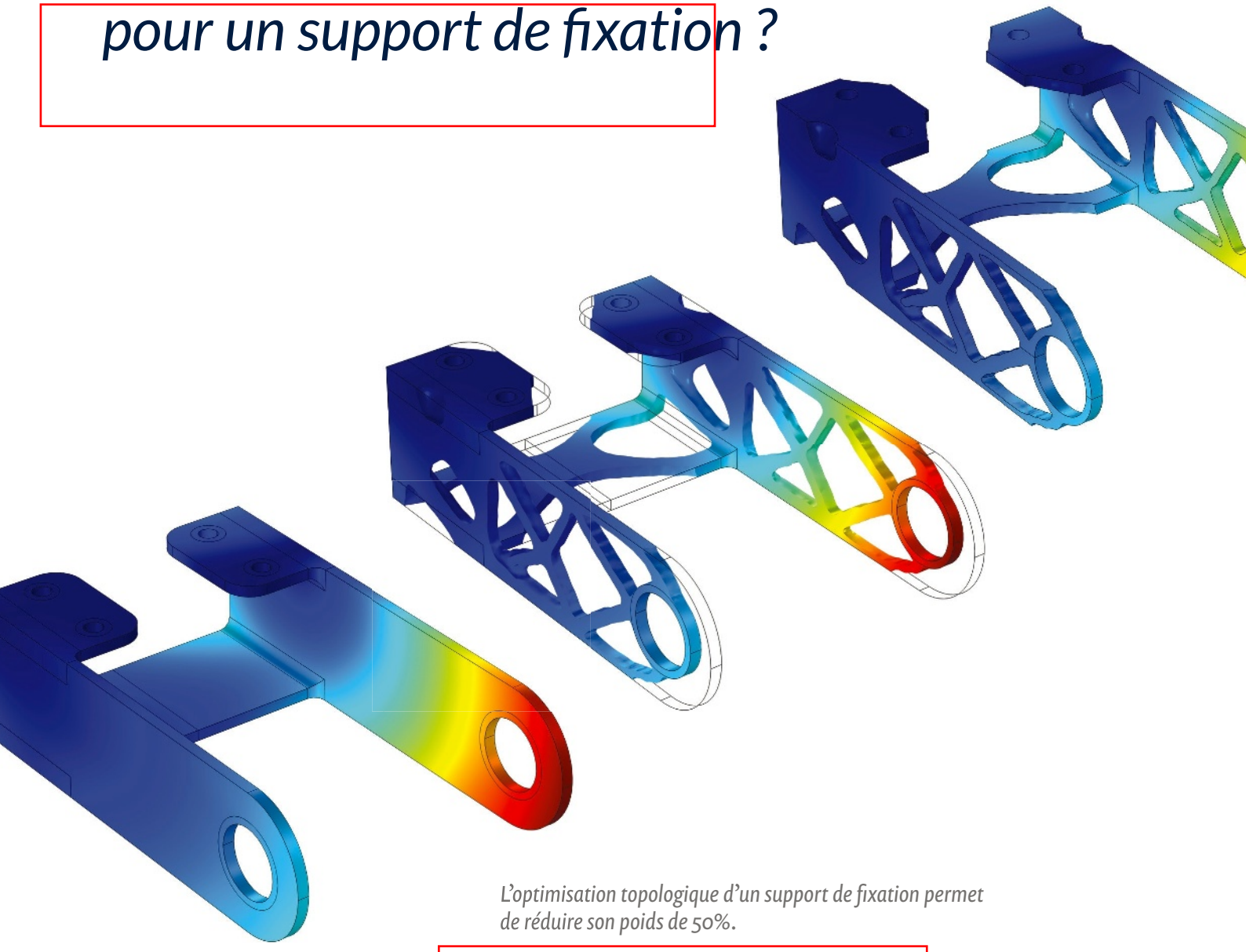


En librairie **le 13 janvier**

Belin

Dédicaces des auteurs à TimeWorld les **21, 22 et 23 janvier au Cnam**

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

COMSOL