COVID-19 Pourquoi trouver l'origine du virus est si difficile

L'analyse du virologue **Étienne Decroly**

POUR LA SCIENCE

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

Environnement
QUEL FUTUR ALIMENTAIRE POUR LA PLANÈTE ?

Biologie animale
L'ÉVOLUTION DES RHINOCÉROS ENFIN ÉCLAIRCIE

Médecine
LES NOUVELLES PISTES CONTRE L'ENDOMÉTRIOSE

06/22

Qubits, code correcteur, changement d'échelle...

ORDINATEUR QUANTIQUE

Les vrais défis

Édition française de Scientific American - Juin 2022 - n° 536

DOM : 8,50 € - BEL/LUX : 8,50 € - CH : 12,00 FS - CAN : 12,99 $CA - TOM : 1100 XPF

L 13256 - 536 S - F : 7,00 € - RD

De cause à effets

Le magazine de l'environnement

Émission spéciale
« Anthropocène : comment l'humanité peut changer l'horizon ? »
avec François Sarrazin écologue, professeur à Sorbonne Université et Sébastien Bolher, docteur en neurobiologie.

LE MARDI
DE 21H À 22H

Aurélie Luneau

Disponible sur franceculture.fr
et l'application Radio France

france culture

L'esprit d'ouver-ture.

En partenariat avec

Pour la Science

© Radio France/Ch. Abramowitz

Pour la Science

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: François Lassagne
Rédacteurs en chef adjoints: Loïc Mangin, Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Élisa Doré

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

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager et partenariats: Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pourlascience.fr

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Ingrid Lhande
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Assistante administrative: Doae Mohamed
Marketing & diffusion: Stéphane Chobert
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:
François Arleo, Jean-Marc Aury, Isabelle Bouchery, Lizzy Brown, Maud Brugière, Paco Cardenas, Jérôme Chave, Anthony Fardet, Jasiek Krzysztofiak, Camille Le Roy, Pierre Léopold, Lorenzo Medini, Franck Montmessin, Florian Moreau, Thierry Perez, Sylvain Petek, Marie Saglio, Nicolas Viovy

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
www.boutique.groupepourlascience.fr
Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 8h30 à 12h30 et de 13h30 à 16h30
Adresse postale:
Service abonnement
Groupe Pour la Science
235 avenue Le Jour se Lève
92100 Boulogne-Billancourt

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmut
President: Stephen Pincock
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

François Lassagne
Rédacteur en chef

PLEINS FEUX

L'ordinateur quantique est, depuis quelques mois, sous le feu des projecteurs. La Chine, les États-Unis et l'Europe en ont récemment fait un sujet stratégique. Les efforts de recherche et développement sont intenses, les annonces des industriels et les publications scientifiques se multiplient. Placer un objet en pleine lumière laisse cependant certains détails dans l'ombre.

Il est très peu probable que des ordinateurs quantiques universels soient construits et fonctionnels dans les dix ans qui viennent, juge Antoine Tilloy, physicien, dans l'interview qui ouvre le dossier que nous consacrons à ces machines. Celles qui existent aujourd'hui ne sont pas universelles (elles ne peuvent pas effectuer n'importe quel type de calcul), ni même, souvent, utiles. Si elles le deviennent dans les dix ans, c'est qu'une approche de rupture aura miraculeusement fonctionné, nous dit le chercheur. Des approches plus conventionnelles pourraient être couronnées de succès, mais annoncent des délais bien plus longs pour ouvrir véritablement l'ère de l'informatique quantique.

Il arrive qu'un sujet s'installe sous les projecteurs non parce qu'il attire naturellement la lumière, mais parce que d'opiniâtres acteurs l'y placent. C'est le cas de l'endométriose, et Marina Kvaskoff, épidémiologiste, contribue, aux côtés d'associations de patientes, à l'intensification des efforts de recherche contre cette maladie, très longtemps restée dans l'ombre, et qui affecte 2,5 millions de femmes en France. Elle a mis en place en 2018 l'une des plus larges cohortes de patientes du monde pour se donner les moyens de cerner au plus près cette pathologie caméléon, et détaille dans ce numéro, avec Daniel Vaiman et Charles Chapron, les pistes qui promettent d'en améliorer le diagnostic et la prise en charge.

Il n'est pas dit que les zones d'ombre des ordinateurs quantiques n'auront pas raison de l'enthousiasme actuel pour ces machines. On peut espérer que la lutte contre l'endométriose rattrape le temps perdu, à présent qu'elle progresse en pleine lumière. ■

SOMMAIRE

N° 536 / Juin 2022

ACTUALITÉS

P. 06
ÉCHOS DES LABOS
- Le génome humain séquencé en intégralité
- Estimer l'ampleur d'une éruption à distance
- Un boson W trop lourd?
- L'impact biophysique des forêts
- Une sépulture égyptienne révèle ses odeurs
- L'épigénétique en renfort
- Adaptation d'un vampire
- Un vol entre stabilité et manœuvrabilité
- Le son sur Mars

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
DISPUTES ENVIRONNEMENTALES
Des guerres contre nature
Catherine Aubertin

P. 20
LES SCIENCES À LA LOUPE
Comment distinguer les experts des «ex-pairs»?
Yves Gingras

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS LA P. 40)

L'IRSN et les feux électriques.
Des recherches de grande intensité
parrainé par
IRSN

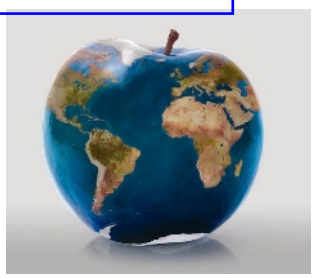
GRANDS FORMATS

DOSSIER SPÉCIAL

P. 50
MÉDECINE

ENDOMÉTRIOSE, UNE MALADIE CAMÉLÉON
Jena Pincott

Enfin la communauté médicale attaque sur tous les fronts cette pathologie douloureuse et multiforme qui touche 10 % des femmes en âge de procréer dans le monde.



P. 44
VIROLOGIE

ORIGINE DU COVID-19
«SANS INFORMATIONS PRÉCISES SUR CE QUI SE PASSAIT DANS LE LABORATOIRE DE WUHAN ON N'AVANCERA PAS!»
Entretien avec Étienne Decroly

Après plus de deux ans d'investigations, il reste difficile de dire quand et où est apparu le SARS-CoV-2, à l'origine de la pandémie. Plusieurs hypothèses sont en lice, et toutes sont, à ce jour, plausibles.

P. 66
NUTRITION

FUTUR ALIMENTAIRE
QUEL RÉGIME POUR LA PLANÈTE ?
Gayathri Vaidyanathan

Le régime alimentaire idéal doit nourrir correctement sans menacer les ressources naturelles. Des chercheurs tentent de le déterminer en fonction de la situation de chaque pays, depuis le Kenya jusqu'à la Suède.

Pour la Science.fr
LETTRE D'INFORMATION

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

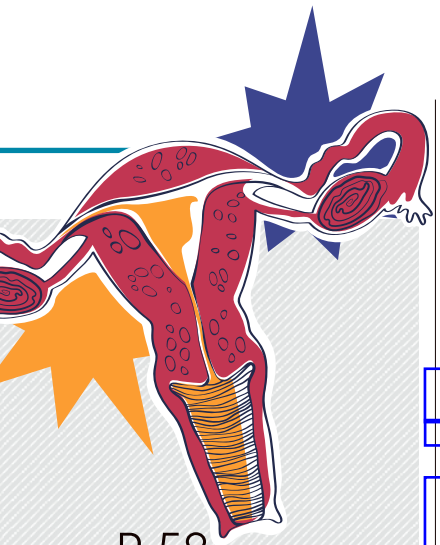
- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr

En couverture :
© sdecoret/shutterstock

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

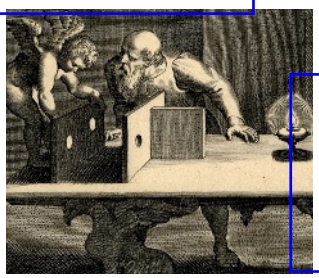
Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, broché en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.



P. 58
GÉNÉTIQUE

UNE PATHOLOGIE ÉCLAIRÉE PAR LA GÉNOMIQUE
Daniel Vaiman, Marina Kvaskoff et Charles Chapron

Grâce aux techniques de séquençage à haut débit, un portrait plus précis de l'endométriose se dessine et révèle une maladie complexe et hétérogène.



P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES

L'ILLUMINATION DE PIERRE BOUGUER
Lionel Simonot

L'art de mesurer la lumière, si utile aujourd'hui pour évaluer les performances de nos dispositifs d'éclairage ou pour classer les objets célestes, a vu le jour dans un court *Essai d'optique* paru en 1729, qui a marqué son temps et bien au-delà...

À LA UNE

P. 22
INFORMATIQUE QUANTIQUE

Code correcteur, qubits, changement d'échelle...

ORDINATEUR QUANTIQUE Les vrais défis

P. 24

« L'ORDINATEUR QUANTIQUE NE SE RÉSUME PAS À UNE COURSE AUX QUBITS »
Entretien avec Antoine Tilloy

Derrière les promesses de l'ordinateur quantique et les effets d'annonce, les défis théoriques et techniques sont encore nombreux. Erreurs, qubits physiques, profondeur de portes, puissance de calcul... Autant de contraintes interconnectées, que les spécialistes cherchent aujourd'hui à alléger pour construire l'ordinateur de demain.

P. 31

CALCULER PLUS VITE... ET SANS ERREURS ?
Zaira Nazario

Les lois de la physique qui rendent les ordinateurs quantiques si puissants sont aussi à la source de leur grande fragilité. Des techniques toujours plus performantes sont indispensables pour corriger les erreurs plus rapidement qu'elles ne s'accumulent.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL

DES CRYPTOMONNAIES SOBRES EN ÉNERGIE ?
Jean-Paul Delahaye

Un problème de récréation mathématique met en lumière la difficulté à concevoir des cryptomonnaies justes, économes et écologiques.

P. 86
ART & SCIENCE

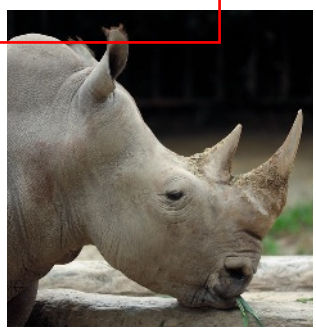
Nobelles pour toi
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE

Gras et muscles bien balancés
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

La corne de la discorde
Hervé Le Guyader



P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE

Réinventons les pâtes, varions leurs protéines !
Hervé This

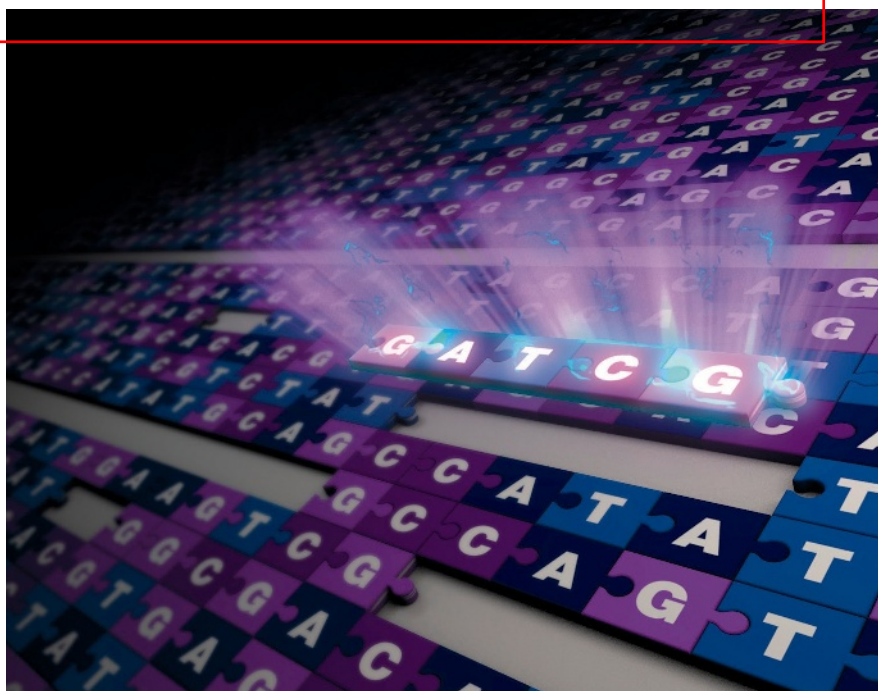
P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.16 *Livres du mois*
P.18 *Disputes environnementales*
P.20 *Les sciences à la loupe*

GÉNÉTIQUE

LE GÉNOME HUMAIN ENFIN SÉQUENCÉ DANS SON INTÉGRALITÉ



Le projet *Génome humain* avait ouvert la voie il y a vingt ans avec un séquençage quasi complet. Une nouvelle équipe vient de révéler les parties manquantes.

Vingt ans après le séquençage presque intégral du génome humain, un consortium de généticiens publie une nouvelle version complète de notre code génétique.

Entre 1990 et 2001, le projet *Génome humain* a cartographié le code génétique de notre espèce. Mais, pour des raisons techniques, près de 8% de l'ADN manquait à l'appel, soit l'équivalent d'un chromosome entier. Un consortium de plus de cent chercheurs sous la direction d'Adam Philippy, de l'Institut américain de recherche sur le génome humain, à Bethesda, et de Karen Miga, de l'université de Californie à Santa Cruz, a repris le flambeau et, au terme de trois ans de travail, vient de publier le tout premier génome humain complet.

Séquencer un génome consiste à découper, lire et mettre bout à bout des séquences de bases nucléiques – les composés chimiques constitutifs de l'ADN, associés à différentes lettres (A, C, G et T) en fonction de leur nature. À son époque, le projet *Génome humain* a livré un génome humain de référence qui a révolutionné le monde de la biologie et de la médecine. Disponible en ligne librement, cet outil est consulté par les chercheurs du monde entier pour étudier l'évolution des variations génétiques humaines et par les médecins pour rechercher les mutations associées à diverses maladies. Mais l'équipe du projet *Génome humain* avait été confrontée à une difficulté. Les techniques de l'époque ne permettaient de manipuler que des séquences assez courtes, d'une centaine à un millier de bases. Certaines régions du génome étant très répétitives – la même lettre apparaît, encore et encore –, il était alors très difficile de réassembler ces séquences, à l'image d'un puzzle dont certaines pièces seraient parfaitement identiques.

> Le nouveau génome est composé de 3,055 milliards de bases nucléiques

Or les chapitres manquants du génome contiennent aussi des gènes importants. Pour compléter cet ouvrage, Adam Philippy, Karen Miga et leurs collègues ont lancé le projet T2T («du télomère au télomère») pour réaliser un séquençage intégral. Les télomères sont les extrémités longues et diffuses des chromosomes. Ces régions sont très répétitives et n'avaient pas été bien couvertes par le projet des années 1990.

© Ernesto del Aguila III, NHGRI

Une autre région particulièrement riche en répétition est le centromère, la partie centrale et dense au niveau de laquelle les chromosomes sont coupés lors de la division cellulaire.

Pour séquencer ces régions répétitives, l'équipe s'est appuyée sur certaines avancées techniques majeures : les machines de séquençage « longue lecture ». Celle de l'entreprise britannique Oxford Nanopore Technologies est capable de lire jusqu'à 1 million de lettres de l'ADN en une seule fois, avec une précision correcte, mais pas optimale, tandis que celle de la compagnie américaine Pacific Biosciences peut en lire environ 20 000 mais avec une précision de 99 %. C'est en combinant ces deux approches que les chercheurs ont reconstruit, après de longs mois, chaque chromosome, d'un télomère à l'autre.

Le nouveau génome publié est composé de 3,055 milliards de paires de bases nucléiques et de 19 969 gènes codant des protéines. Parmi ces derniers, 3 604 sont uniquement décrits par ce modèle, mais seulement 140 d'entre eux sont susceptibles d'être exprimés chez un individu donné, les autres étant inactifs. De plus, en comparant à différentes bases de données, les chercheurs ont identifié 2 millions de variants de gènes supplémentaires grâce à ce génome, parmi lesquels 622 concernent des gènes à l'importance médicale reconnue. Ces résultats révèlent aussi de tous nouveaux détails à propos du centromère, dont le fait que les variations génétiques y sont particulièrement nombreuses. Leur étude devrait permettre aux chercheurs d'en apprendre plus sur notre histoire évolutive, mais aussi de comprendre comment elles contribuent à l'émergence de certaines maladies.

Ce premier génome complet a été réalisé à partir d'une seule et unique personne. Des membres du consortium aspirent désormais à lire les séquences ADN entières de centaines de personnes issues du monde entier, afin de capturer de façon exhaustive la diversité humaine. En attendant, ce génome fait office de véritable pierre de Rosette, grâce à laquelle chercheurs et médecins pourront examiner les variations génétiques dans des centaines de milliers d'autres génomes. ■

William Rowe-Pirra

S. Nurk *et al.*, *Science*, 2022

GÉOSCIENCES

Estimer l'ampleur d'une éruption à distance

Le 15 janvier 2022, l'éruption d'un volcan sous-marin a détruit 90 % de l'île inhabitée de Hunga Tonga Ha'apai. En général, le suivi de ces événements dans des zones reculées est difficile, faute de données sur place. Le géophysicien Piero Poli a mis au point un algorithme pour les étudier à distance.

Propos recueillis par Élisa Doré

PIERO POLI
géophysicien
à l'université
Grenoble-Alpes

En quoi l'éruption volcanique de Hunga Tonga est-elle exceptionnelle ?

À l'origine d'un panache de cendres de 50 kilomètres de hauteur, l'éruption du volcan Hunga Tonga est probablement la plus importante survenue au XXIe siècle. Elle a engendré des perturbations de l'atmosphère ainsi qu'un tsunami qui a touché plusieurs régions côtières à travers le Pacifique. Jusqu'ici, les scientifiques devaient se rendre sur le terrain pendant plusieurs semaines pour estimer le volume de cendres et de laves produites. Mais pour des volcans comme Hunga Tonga, très éloignés des stations géophysiques et situés en plein océan, se rendre sur le terrain est d'autant plus laborieux. Pouvoir produire une estimation rapide des paramètres d'une éruption volcanique par d'autres techniques est donc un enjeu actuel majeur.

Quelle méthode avez-vous utilisée pour évaluer l'ampleur de cette éruption ?

Nous avons développé une méthode pour identifier rapidement les éruptions explosives en nous fondant sur l'analyse des données sismiques, et plus particulièrement l'enregistrement des ondes de surface dites Rayleigh. Ces ondes sont enregistrées presque en temps réel dans de nombreuses stations à travers le globe et sont obtenues dans les deux heures qui suivent l'éruption. Pour déterminer l'amplitude de l'éruption du volcan Hunga Tonga, nous avons simulé la force verticale nécessaire pour produire les signaux enregistrés.

Nous avons ensuite dérivé le volume de matériel éjecté à partir de nos données sismologiques afin de déterminer l'indice d'explosivité volcanique (VEI), qui s'étend sur une échelle de 0, pour les éruptions de faible ampleur avec peu de volume éjecté, à 8 pour des éruptions explosives qui rejettent de grands volumes de matière. Avec notre modèle, nous estimons que l'éruption du volcan Hunga Tonga a éjecté un volume de 10 kilomètres cubes de matériel volcanique avec un VEI d'environ 6.

Comment avez-vous testé cet algorithme ?

Pour vérifier la robustesse de notre modèle, nous avons appliqué la même analyse aux données enregistrées en 1991 lors de l'éruption du volcan Pinatubo, en Indonésie. Pour ce volcan, les caractéristiques de l'ampleur de l'éruption avaient été obtenues à l'aide de données collectées sur le terrain, ce qui avait permis d'estimer précisément le volume de matériel éjecté (10 kilomètres cubes) et son VEI (6), identiques aux paramètres que nous avons estimés pour le volcan Hunga Tonga. En utilisant seulement les données sismiques enregistrées en 1991, nous avons obtenu les mêmes résultats qu'avec les données collectées sur le terrain. Ainsi, notre méthode est assez fiable pour fournir un ordre de grandeur général des caractéristiques d'une éruption.

Cet algorithme pourrait-il remplacer les méthodes standard pour l'étude des volcans ?

Le point fort de cette méthode est qu'elle est facile d'utilisation car elle est fondée sur l'enregistrement de données sismologiques qui sont faciles et rapides à obtenir. Cependant, elle ne fournit que des ordres de grandeur de l'ampleur d'une éruption car certaines informations, que nous pourrions seulement obtenir sur le terrain, sont manquantes. Ainsi notre méthode doit rester complémentaire des méthodes directes, plus précises mais plus fastidieuses. Nous espérons néanmoins que notre démarche sera généralisée afin d'étudier plus facilement les grandes éruptions. Il serait également intéressant d'explorer le potentiel de notre méthodologie appliquée à d'autres situations qui engendrent aussi des signaux sismiques comme les tremblements de terre et l'activité de volcans sous-marins de grande profondeur. ■

P. Poli et N. M. Shapiro, *Geophysical Research Letters*, 2022

PHYSIQUE DES PARTICULES

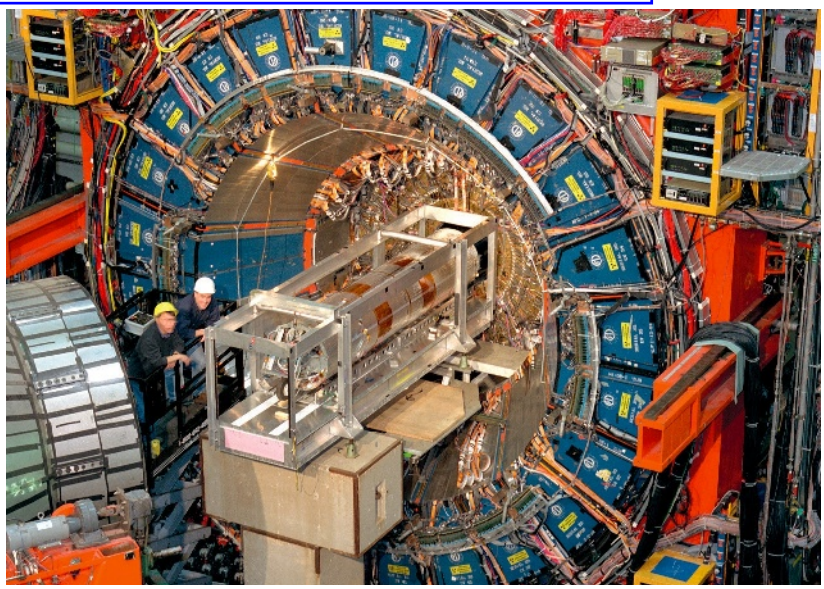
QUI A COMMANDÉ UN BOSON W TROP LOURD ?

La nouvelle mesure de la masse de cette particule est plus lourde que ce que prévoit le modèle standard. Faut-il y voir un signe de nouvelle physique ?

En 1936, lors de la découverte du muon, une version plus massive de l'électron, le physicien Isidor Isaac Rabi (prix Nobel en 1944) s'était exclamé « mais qui a commandé cela ? ». Cette histoire fait écho au résultat récent de la collaboration *CDF* (*Collider Detector at Fermilab*), une expérience de l'accélérateur du Fermilab, près de Chicago. Malgré l'arrêt de ce collisionneur en 2011, les physiciens ont continué d'analyser les données collectées. Et après dix ans de travail, une équipe vient d'annoncer l'estimation de la masse du boson W, une particule responsable de l'interaction faible : 80 433 mégaélectronvolts (un peu plus de 80 fois la masse d'un proton) avec une incertitude de seulement 0,01 %. Or ce résultat est incompatible avec la valeur théorique de 80 357 mégaélectronvolts calculée dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Comment comprendre cette différence infime de 0,1 % ? Le modèle standard est-il défaillant, ou y a-t-il un problème avec l'analyse ?

Depuis cinquante ans, le modèle standard de la physique des particules a été testé de maintes façons et n'a jamais été mis en défaut. Pourtant, les spécialistes ont de bonnes raisons de penser que ce modèle n'est pas la description ultime des particules fondamentales. Les physiciens cherchent donc les indices d'une théorie plus fondamentale dont le modèle standard ne serait qu'une approximation. Un tel indice se manifesterait par l'intermédiaire d'une mesure dont le résultat s'écarterait sensiblement de ce que prévoit le modèle.

L'annonce sur la masse du boson W est-elle donc le signal tant attendu ? Malheureusement, la situation est loin d'être simple. De précédentes estimations, au LHC (Large Hadron Collider) notamment, sont toutes compatibles avec la prédiction du modèle standard. Pour Matthias Schott, de l'université de Mayence, en Allemagne, spécialiste de cette mesure sur l'expérience *Atlas*, au LHC, la priorité n'est donc pas de comprendre l'écart entre la mesure de *CDF* et le modèle standard, mais de comprendre pourquoi ce résultat est si différent des autres. La prudence est effectivement de mise. La mesure de la masse du boson W a la réputation d'être particulièrement difficile. « C'est le genre d'analyse où le diable se cache dans les détails », souligne Olivier Arnaez, physicien de l'expérience *Atlas*.



L'expérience *CDF* au Fermilab, près de Chicago, a enregistré des données de collisions à haute énergie entre 1985 et 2011. Près de 400 chercheurs dans 28 pays continuent d'analyser ces données. L'expérience est un assemblage de détecteurs qui enregistrent la trajectoire et l'énergie des différentes particules produites lors d'une collision.

Pour les théoriciens, en faisant le pari de la validité de la mesure de *CDF*, ce résultat est l'occasion d'éprouver des hypothèses qui expliqueraient cette masse « anormale » du boson W. Différentes pistes sont explorées, telle la supersymétrie, une théorie qui suggère que chaque particule du modèle standard est dotée d'un superpartenaire plus massif.

Avec le redémarrage prochain du LHC, il y a de fortes chances que les équipes auront à cœur de poursuivre cette analyse avec de nouvelles données, mais surtout en étudiant les effets fins dans les données déjà collectées. Mais si les résultats au LHC confirment une compatibilité avec le modèle standard, comment les concilier avec la valeur de *CDF* ? « Sur le sujet de la masse du boson W, je pense qu'il est temps de dépasser les résultats individuels des expériences du Fermilab et du LHC et de privilégier une mise en commun des meilleures pratiques avec possiblement un partage des données. L'union fait la force ! », commente Olivier Arnaez. ■

Sean Bailly

Collaboration CDF, *Science*, 2022

© Fermilab

EN BREF

Contrôle du vol chez l'abeille

Comment les abeilles contrôlent-elles leur altitude de vol ? Julien Serres, de l'université Aix-Marseille, et ses collègues ont testé l'hypothèse selon laquelle ces insectes utilisent la vitesse de défilement du sol (plus on est haut plus le sol défile lentement). Ils ont introduit des abeilles dans un tunnel dont le sol et le plafond étaient recouverts de miroirs qui annulent l'effet de défilement. Les abeilles étaient désorientées et finissaient par s'écraser contre les parois.

Biology Letters, 23 mars 2022

Le plus vieux calendrier Maya

À l'aide d'une datation au radiocarbone de peintures murales issues du site maya San Bartolo, au Guatemala, David Stuart, de l'université du Texas à Austin, et ses collègues ont trouvé une preuve de la plus ancienne notation connue du calendrier maya : une date, « 7 Cerfs », inscrite de 300 à 200 ans avant notre ère. Cette date faisait partie du calendrier divinatoire de 260 jours utilisé dans toute la Méso-Amérique.

Science Advances, 13 avril 2022

La mémoire des cellules intestinales

Lors d'une réinfection, les cellules de l'immunité adaptative neutralisent plus vite les agents pathogènes déjà rencontrés grâce à leur fonction mémoire. Or l'équipe de James Di Santo, de l'institut Pasteur, a aussi identifié, dans l'intestin, une fonction mémoire chez des cellules de l'immunité innée, le système de défense précoce de l'organisme. Lors d'une nouvelle infection, ces dernières réduisent plus efficacement la charge bactérienne grâce à une prolifération accrue et une production massive de molécules pro-inflammatoires.

Science, 25 février 2022

© Heiri Paves/shutterstock (en haut) ; © BorneoRimbawan/Shutterstock (en bas)

BIOLOGIE ÉVOLUTIVE

UNE ATTIRANCE HÉRITÉE

Pour savoir si les parents peuvent transmettre à leurs descendants la réponse de leur organisme à une influence environnementale, Oded Rechavi, de l'université de Tel Aviv, et ses collègues se sont intéressés à la transmission de l'attractivité sexuelle chez le nématode *Caenorhabditis elegans*. Ce ver est en général hermaphrodite, 1 individu sur 200 étant un mâle. Son mode de reproduction le plus fréquent est l'autofécondation. Mais une température de milieu trop élevée change sa stratégie reproductive. Les vers sécrètent de façon précoce une phéromone qui attire les mâles. Après que dix générations ont été soumises à ce stress, les chercheurs ont constaté que leurs descendants maintenaient le même comportement pendant trois générations même si la température redevenait normale. Les chercheurs ont alors étudié, dans les cellules germinales, des petits ARN interférents, produits en réponse à certaines conditions environnementales, tel un stress thermique. Ces petits ARN influent sur l'expression de divers gènes en clivant spécifiquement des séquences d'ARN messagers. Pour savoir si les ARN interférents sont impliqués dans l'héritage de l'attirance sexuelle, l'équipe d'Oded Rechavi a empêché leur transmission à la descendance en désactivant Argonaute HRDE-1 (cette protéine, couplée aux petits ARN, assure leur transmission) chez les parents stressés. Le pool des ARN interférents était alors appauvri chez la progéniture non stressée, qui ne présentait plus le caractère sexué. Les générations non stressées héritent donc de la capacité à devenir précocement attrayantes grâce à la transmission d'ARN parentaux synthétisés en réponse au stress. ■

Caenorhabditis elegans est un ver nématode transparent d'environ 1 millimètre. Il est devenu un organisme modèle en biologie pour établir les bases génétiques et moléculaires du développement.

Élisa Doré

I. A. Toker *et al.*, *Cell Reports*, 2022

CLIMATOLOGIE

L'IMPACT BIOPHYSIQUE DES FORÊTS

Les forêts jouent un rôle important dans la régulation du climat. Notamment, elles captent de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère et le séquestrent sur de longues périodes. Mais leur contribution comporte aussi d'autres phénomènes bien moins documentés. Deborah Lawrence, de l'université de Virginie, aux États-Unis, et ses collègues ont évalué les contributions relatives de trois effets biophysiques principaux : l'albédo, le pouvoir réfléchissant d'une surface (les nuages, comme la neige, réfléchissent beaucoup la lumière alors que les forêts l'absorbent) ; l'évapotranspiration des arbres, où l'eau du sol, transférée vers l'atmosphère et transformée en vapeur d'eau, refroidit le milieu ; la rugosité de la canopée, une microtopographie qui, soumise au vent, produit des microturbulences, ce qui dissipe la chaleur et refroidit le milieu. Au total, ces effets biophysiques refroidissent la planète d'environ 0,5 °C, ce qui correspond à un tiers de la contribution des forêts au climat. ■

Les forêts séquestrent le dioxyde de carbone mais ont aussi d'autres actions biophysiques sur le climat.

Isabelle Bellin

D. Lawrence *et al.*, *Frontiers in Forest and Global Change*, 2022

ARCHÉOLOGIE

© funkyfood London - Paul Williams / Alamy Banque D'Images

Ce « papyrus funéraire de la dame Merit » a été retrouvé dans la sépulture égyptienne de Khâ et Merit, à Deir el-Medina. C'est un extrait du rituel, à propos des transformations de l'âme en enfer. La défunte et son époux sont présentés à Osiris avec des offrandes, dont des jarres contenant diverses victuailles.

LA SÉPULTURE ÉGYPTIENNE DE KHÂ ET MÉRIT RÉVÈLE SES ODEURS

En 1906, Ernesto Schiaparelli, directeur du musée de Turin, découvrait la sépulture de deux personnalités influentes, Khâ et sa femme Mérit, dans la nécropole de Deir el-Medina, en Égypte. Plus de 3 400 ans après l'inhumation de ces derniers, 440 objets contenant notamment des offrandes destinées à nourrir leurs âmes éternelles ont été retrouvés dans la sépulture. Jacopo La Nasa, de l'université de Pise, et ses collègues ont analysé le contenu préservé dans les artefacts afin de reconstituer le « paysage olfactif » de la sépulture. Pour y parvenir, ils ont emballé divers récipients dans des sacs en plastique (*voir la photo ci-dessous*) afin de collecter les molécules volatiles qui émanent d'infimes résidus de leur contenu initial puis ils ont identifié ces dernières par une technique d'analyse spectrométrique. Ils ont ainsi trouvé divers composés d'aldéhydes présents dans les fruits mais aussi dans les résines aromatiques végétales, nécessaires à la fabrication d'encens. Plusieurs amphores renfermaient des résidus de triméthylamine que l'on trouve dans le poisson séché, un mets couramment offert aux défunts comme symbole de leur renaissance. Les chercheurs ont aussi retrouvé des dérivés d'aldéhydes et d'alcools ainsi que des composés soufrés issus de la macération de céréales. En effet, lors de funérailles, il n'était pas rare de déposer du pain, de la bière, ainsi que les récipients utilisés pour leur fabrication, à côté des défunts afin d'accompagner leur voyage dans l'au-delà. ■

E. D.

J. La Nasa *et al.*, *Science*, 2022

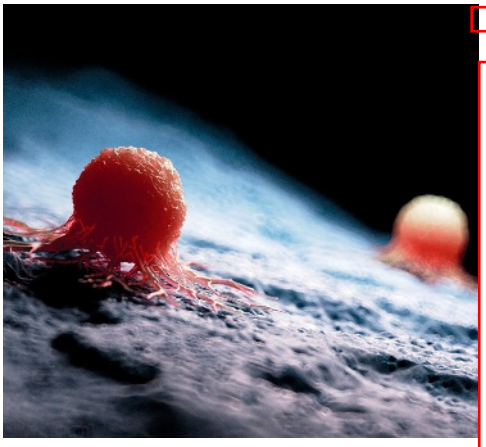
© Jacopo La Nasa/Musée de Turin

CANCÉROLOGIE

L'ÉPIGÉNÉTIQUE EN RENFORT

Si la chimiothérapie est un traitement puissant contre le cancer, des résistances émergent souvent. Mieux comprendre l'origine de ces résistances est nécessaire pour les combattre. Céline Vallot, à l'institut Curie, et son équipe ont exploré la piste de causes épigénétiques. En étudiant les variations épigénétiques (qui influent sur l'expression des gènes) de milliers de cellules tumorales de cancer du sein exposées à la chimiothérapie, les chercheurs ont identifié une modification épigénétique, nommée H3K27me3, qui semble être un élément clé dans la résistance au traitement. Ce marqueur épigénétique est très présent (on le retrouve dans environ 10 % du génome) et sert à désactiver certains gènes. Dans les cas de la résistance à la chimiothérapie, une centaine de gènes semblent l'avoir perdu.

Les chercheurs ont testé leur hypothèse en effaçant – ou à l'inverse en verrouillant – cette modification, avant de soumettre des cellules tumorales à une chimiothérapie. « Quand cette marque est effacée préalablement, toutes les cellules sont capables de résister, détaille Céline Vallot. À l'inverse, quand elle est verrouillée, qu'on l'empêche de s'enlever, la plupart des cellules meurent en présence de la chimiothérapie. »



Certaines tumeurs résistent aux chimiothérapies. L'explication serait liée à des modifications épigénétiques. De quoi envisager un traitement pour rendre leur efficacité… aux traitements.

Sur un modèle animal du cancer du sein, les chercheurs ont utilisé un « médicament épigénétique » déclenchant un verrouillage de ce marqueur associé à une chimiothérapie. La combinaison s'est avérée très efficace. Céline Vallot nuance cependant ce résultat : pour l'instant, cette approche retarde les récidives. Il reste à améliorer cette piste prometteuse et l'adapter à l'humain. ■

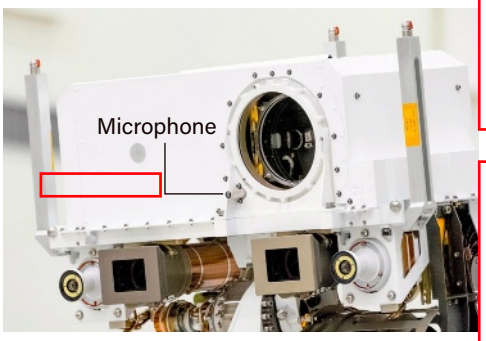
Gaia Jouanna

J. Marsolier *et al.*, *Nature Genetics*, 2022

PLANÉTOLOGIE

LE SON SUR MARS

Grâce aux micros du rover *Perseverance*, Sylvestre Maurice, de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse, du CNRS et du CNES, et ses collègues ont caractérisé l'environnement sonore de Mars. L'atmosphère, composée à 95 % de dioxyde de carbone (CO_2), y est 150 fois moins dense que sur Terre. On s'attendait donc à une vitesse de propagation plus faible. En effet, pour un signal de fréquence inférieur à 240 hertz, la vitesse est de 240 mètres par seconde (contre 340 mètres par seconde sur Terre). Mais les sons plus aigus se déplacent 10 mètres par seconde plus vite ! Cette dispersion, absente sur Terre, « provient de la réponse particulière de la molécule de CO_2 à la variation de pression, donc à une onde sonore, précise Sylvestre Maurice. À basse fréquence, l'énergie communiquée à la molécule par l'onde sonore est distribuée selon différents modes de translation, rotation et vibration. Mais à haute fréquence, le mode de vibration n'a pas le temps de s'activer, les propriétés thermodynamiques sont donc différentes ainsi que la vitesse. » ■



Position du microphone situé sur la caméra SuperCam de *Perseverance*.

Valentin Rakovsky

S. Maurice *et al.*, *Nature*, 2022

EN BREF

Coup de froid sur Neptune

L'inclinaison de Neptune implique que la planète présente, comme la Terre, des saisons. Mais comme elle réalise une révolution autour du Soleil en 165 ans, l'évolution des températures devrait être lente. En compilant différentes observations entre 2003 et 2020, Michael Roman, de l'université de Leicester, au Royaume-Uni, et ses collègues ont cependant constaté un refroidissement brutal de 8 °C sur la période 2003-2018, avant une remontée de 11 °C. Une dynamique inexpliquée !

Planet. Sci. J., 11 avril 2022

Un saut de 30 mètres de haut

Malgré quelques innovations évolutives, tels les ressorts des sauterelles, le saut en hauteur des systèmes biologiques est contraint par le travail que peut déployer un muscle en une fois. Pour dépasser ces limites, Elliot Hawkes, de l'université de Californie à Santa Barbara, et ses collègues ont conçu un robot de 30 centimètres dont le moteur peut libérer de l'énergie en plusieurs fois et ont optimisé le poids du dispositif. Résultat : record pulvérisé avec un saut à plus de 30 mètres de haut.

Nature, 27 avril 2022

Un reptile sur cinq menacé

Dans l'inventaire des tétrapodes menacés d'extinction, on savait que figuraient 41 % des amphibiens, 25 % des mammifères et 13 % des oiseaux. Mais les reptiles manquaient à l'appel. Bruce Young, de l'ONG NatureServe, et un groupe international ont compilé les données disponibles sur près de 10 000 espèces de reptiles. Résultat : 21 % des reptiles sont menacés. Une part qui s'élève à 50 % chez les tortues et les crocodiliens. De quoi alerter sur la nécessité de protéger leurs habitats.

Nature, 27 avril 2022

© SciePro/Shutterstock (en haut) ; © Nasa/JPL-Caltech (en bas)

BIOLOGIE ANIMALE

ADAPTATION D'UN VAMPIRE

Un régime exclusivement sanguin, comme chez les chauves-souris vampires, est très contraignant pour l'organisme. La perte de certains gènes aurait cependant aidé ces dernières à tolérer ce mode d'alimentation. C'est ce qu'ont montré Moritz Blumer, chercheur à l'institut Max-Planck, en Allemagne, et ses collègues en comparant le génome de ces chauves-souris avec celui de 26 autres chiroptères. Ils ont déterminé en quoi certains gènes les aideraient à supporter ce régime particulier. Le vampire aurait notamment perdu un gène (*REP15*) qui régule normalement l'absorption de fer. Une perte qui faciliterait l'excrétion du fer, indispensable alors que ces chauves-souris en ingèrent des quantités 800 fois supérieures à celles des humains. Parmi les autres gènes disparus, certains sont liés à la production d'insuline devenue inutile avec cette alimentation pauvre en sucres. ■

E. D.

M. Blumer *et al.*, *Science*, 2022

BIOPHYSIQUE

UN VOL ENTRE STABILITÉ ET MANŒUVRABILITÉ

Le Grand Héron *(Ardea herodias)* est un oiseau commun dans la plus grande partie de l'Amérique centrale et du Nord. C'est l'une des vingt-deux espèces d'oiseaux que Christina Harvey et ses collègues ont étudiées pour analyser les propriétés d'inertie de leurs ailes.

Les oiseaux parviennent à effectuer de spectaculaires virages serrés en vol. Comme une configuration de vol trop stable fait perdre de la manœuvrabilité à l'animal, les chercheurs pensaient que la physionomie des oiseaux tendait vers une configuration instable. Mais ils manquaient d'éléments expérimentaux pour tester cette hypothèse. Pour y remédier, Christina Harvey, de l'université du Michigan, aux États-Unis, et ses collègues ont déterminé les paramètres qui affectent la stabilité de vol chez vingt-deux espèces. Ils ont modélisé les oiseaux en vol pour connaître la contribution des ailes, du corps et de la queue à l'inertie du système. Les chercheurs ont calculé la position du centre de gravité de chaque oiseau, à savoir le point d'équilibre autour duquel la masse est répartie équitablement. Ils ont aussi estimé le point neutre, c'est-à-dire la position du centre de gravité telle que la somme des forces (poids, portance, traînée) s'annule (auquel cas la stabilité du vol est maximale). La stabilité des oiseaux en vol repose sur la relation entre ces deux points. Un oiseau est dans une configuration stable, mais peu manœuvrable, à partir du moment où le point neutre est situé en arrière du centre de gravité: si le volatile bascule vers le haut à cause du vent, il reviendra à sa position initiale sans avoir besoin de modifier sa posture. Si le point neutre est situé devant le centre de gravité, cette configuration est moins stable mais autorise plus de manœuvrabilité. Les chercheurs suggèrent ainsi que le vol des oiseaux n'est un système ni stable ni instable, mais présente la capacité de passer d'un régime à l'autre par la modification de la forme des ailes pour que le point neutre soit positionné en avant ou en arrière du centre de gravité en fonction des besoins. ■

E. D.

C. Harvey *et al.*, *Nature*, 2022

ARCHÉOLOGIE/GÉOLOGIE

UN SÉISME GÉNOCIDAIRE DANS L'ATACAMA

Une équipe de l'université du Chili vient de montrer qu'un tsunami a éradiqué la population préhistorique qui vivait sur 1000 kilomètres de côte le long du désert de l'Atacama, au nord du Chili actuel. Les chercheurs ont découvert sur 12 sites des soulèvements simultanés de paléo-plages de 6 à 7 mètres surmontées de dépôts chaotiques, caractéristiques du passage d'un flux et d'un reflux marins. La modélisation du séisme tsunamigène suggère une magnitude de 9,5, soit celle du mégaséisme de Valdivia, au Chili, en 1960, la plus grande jamais observée. Les âges radiocarbones des coquillages prélevés dans les dépôts situent le mégaséisme il y a 3800 ans. Après l'événement, la côte de l'Atacama ne fut recolonisée que 1000 ans plus tard. Le risque d'un tsunami comparable existe aujourd'hui encore pour les populations actuelles. ■

François Savatier

Diego Salaza *et al.*, *Sci. Advances*, 2022

© Gregory Johnston/Shutterstock

ÉTHOLOGIE

UN FAIBLE POUR LA SYMÉTRIE

Mécanisme majeur de l'évolution, la sélection sexuelle se manifeste par l'effort des mâles pour développer des traits plus attrayants, comme la symétrie, que ceux de leurs rivaux afin de séduire les femelles. Pour caractériser le rôle de la symétrie des mâles dans la préférence des drosophiles femelles, l'équipe de Pierre Léopold, de l'institut Curie, à Paris, a d'abord induit une asymétrie dans les ailes de certains mâles et les a présentés à des femelles : ces dernières préféraient copuler avec des mâles aux ailes symétriques par rapport à leurs concurrents. Mais comment estiment-elles la symétrie de leurs partenaires potentiels ? Même dans de mauvaises conditions de lumière, les femelles ont continué à préférer les mâles symétriques, ce qui a permis d'éliminer les indices visuels comme facteur de choix. Les chercheurs ont alors rendu les femelles sourdes par une ablation de cils situés sur leurs antennes, responsables de la perception auditive. Cela a perturbé leur faculté à discriminer les mâles symétriques des mâles asymétriques. Ce résultat suggère que la perception du son émis par les ailes des mâles était indispensable aux femelles pour choisir un mâle symétrique. En

Drosophila melanogaster est une espèce de drosophile modèle dans le domaine de la recherche en biologie animale.

effet, lors de parades nuptiales, les mâles drosophiles courtisent les femelles en faisant vibrer leurs ailes afin de produire un chant de cour. Or l'asymétrie des ailes se manifeste dans l'amplitude et la fréquence des signaux acoustiques produits par les ailes des mâles, qui ne plaisent pas aux femelles. Ainsi, les drosophiles femelles évaluent les chants nuptiaux et choisissent par ce biais les partenaires les plus symétriques pour se reproduire. ■

E. D.

R. K. Vijendravarma *et al.*, *PNAS*, 2022

PHYSIQUE

LA CONVECTION DOPÉE

Le phénomène de convection est bien connu de tous : on l'observe dans la casserole qui bout. L'eau plus chaude au fond remonte et libère son surplus d'énergie près de la surface plus froide avant de redescendre. Ce processus et ses propriétés sont étudiés depuis longtemps en physique. Mais un cas était jusque-là peu scruté : celui où la température d'une des couches de fluide oscille dans le temps. Des simulations numériques suggéraient que cette configuration conduisait à un transfert d'énergie thermique plus important. Grâce à une expérience, Ladislav Skrbek, de l'université Charles, à Prague, en République tchèque, et ses collègues viennent de confirmer cet effet. La convection est un élément clé de la dynamique des océans et de l'atmosphère. Or les températures du sol oscillent à cause de l'alternance jour-nuit. Il s'agit donc à présent

La convection est un moteur puissant de la formation des nuages et des cyclones.

d'estimer à quel point ce nouvel effet influe sur les transferts thermiques à l'œuvre dans l'atmosphère afin de mieux modéliser les phénomènes climatiques. ■

Sylvain Guilbaud

P. Urban *et al.*, *Physical Review Letters*, 2022

EN BREF

Des éponges recycleuses

Sur les flancs des volcans sous-marins inactifs de Langseth, en Arctique, Teresa Morganti, de l'institut Max-Planck, en Allemagne, et ses collègues ont découvert un jardin d'éponges vieilles de 300 ans. Or, en raison de l'absence d'activité de dégazage volcanique, l'apport en carbone du milieu n'atteindrait que 1 % des besoins de ces organismes. Pour pallier ce déficit, ces derniers se nourriraient des restes d'un peuplement de vers chimiosynthétiques, présents il y a 2 000 à 3 000 ans, quand les volcans étaient actifs. Ces résidus sont riches en composés sulfurés et en chitine (une source de matière organique), que le microbiote des éponges est capable de transformer en carbone et en azote.

Nature Comm., 8 février 2022

Menace sur la créativité

L'épidémie de Covid-19 a généralisé le télétravail et les réunions virtuelles. Comment ce nouveau mode d'interaction influe-t-il sur la conception de nouvelles idées ? À partir d'expériences avec 602 participants, Melanie Brucks, de l'université Columbia, et Jonathan Levav, de l'université Stanford, ont montré que ces réunions n'altèrent pas la prise de décision. En revanche, elles seraient néfastes pour la créativité. Le fait de moins détacher son regard de l'écran limite la possibilité de laisser libre cours à l'imagination.

Nature, 27 avril 2022

© khuntgeemer/shutterstock (en haut, à droite) ; © Alfred-Wegener-Institut / PS101 AWI OFOS system (en haut, à gauche) ; © Cammie Czuchnicki/Shutterstock (en bas)

LES ÉLITES AVARES ÉTAIENT PROTO-MONGOLES

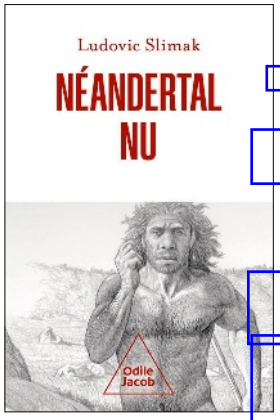
L'origine du royaume des Avars, établi entre 568 et 800 dans le bassin des Carpathes, était jusqu'ici inconnue. L'analyse de l'ADN extrait de squelettes inhumés pendant l'ère avare – on connaît quelque 100 000 inhumations datant de cette époque, dont certaines contenaient un riche mobilier (*voir l'image ci-contre*) – montre qu'ils s'apparentaient principalement aux populations qui vivaient alors – et vivent toujours – sur le plateau mongol. C'est ce qu'a montré l'équipe de Johannes Krause de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, en étudiant 48 génomes présumés avars, dont 25 proviennent du centre de pouvoir principal du khanat – l'interfluve Danube-Tisza. Il ressort des modélisations des chercheurs que les élites avares avaient 90 % de gènes issus de haute Asie et 10 % de gènes Européens, en d'autres termes qu'elles étaient avant tout proto-mongoles. Ce résultat confirme les dires de l'historien byzantin Théophylacte Simocatta, qui au VII^e^ siècle, écrivait que ce qu'il nommait les « vrais Avars » étaient un groupe issu de l'« empire rouran », une confédération tribale, qui maintint son emprise sur les steppes de haute Asie de la fin du IV^e^ siècle à la fin du VI^e^ siècle. Quoi qu'il en soit, les Avars, comme avant eux les Huns et après eux les Mongols, illustrent que la steppe d'Europe centrale est depuis très longtemps le terminus d'une autoroute steppique, qui a canalisé les envahisseurs asiatiques. ■

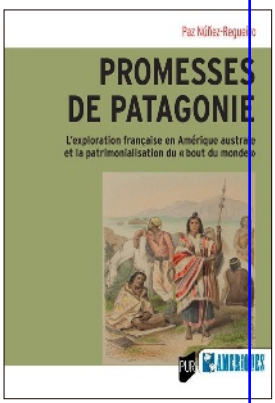
F. S.

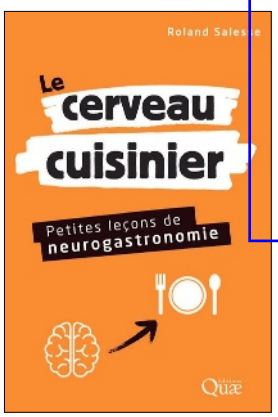
G. A. Gnecchi-Ruscone *et al.*, *Cell*, 2022

Une sépulture d'homme avar à Kunbábony en Hongrie contenait des armes ornées de feuilles d'or, des ceintures ornées de boucles et des récipients à boire.

© V. Csáky et al., Sci. Rep., vol. 10, article 948, 2020







PRÉHISTOIRE

NÉANDERTAL NU
Ludovic Slimak
Odile Jacob, 2022
240 pages, 22,90 euros

Cet ouvrage aurait pu être un énième pavé sur l'humanité disparue des Néandertaliens, n'ayant pour intérêt que d'être plus récent que les autres et ainsi de présenter quelques nouveautés. Il n'en est rien. L'auteur adopte une approche originale: évitant de noyer le lecteur sous une multitude de sites néandertaliens plus ou moins bien datés, il ne discute que quelques sites, de surcroît pas toujours très connus. Il fustige la pensée dominante actuelle qui fait des Néandertaliens une pâle copie de nous-mêmes. Sa démarche s'inscrit dans le désir contemporain de dépasser la vision simpliste d'un Néandertal bestial et stupide qui les a accablés pendant la première centaine d'années qui a suivi leur découverte. Toutefois, il veille à ne pas aller trop loin: nous sommes en effet passés d'un racisme à un autre, car ne pas reconnaître la spécificité de l'humanité néandertalienne, c'est nier sa véritable identité. C'est pourquoi le titre qu'a choisi l'auteur est révélateur: il indique qu'il entend retirer tous les oripeaux et guenilles dont les savants ont couvert les Néandertaliens depuis leur découverte officielle en 1856.
On note cependant qu'il n'aborde la question que d'après les sites à Néandertaliens qu'il a étudiés ou fouillés lui-même, certains depuis près de trente ans. Cela donne le sentiment qu'il se coupe quelque peu de ce que dit et produit le reste de la communauté scientifique, ce qui, si c'est le cas, est problématique.
Pour autant, ce livre est un excellent ouvrage qui amènera tout lecteur à se poser des questions aussi bien sur notre façon de percevoir l'humanité néandertalienne que sur le poids de la société sur notre vision du monde actuel et passé.

JEAN-LUC VOISIN
Aix-Marseille Université

MATHÉMATIQUES

MATHEMATICA
David Bessis
Seuil, 2022
368 pages, 19,90 euros

L'auteur, mathématicien, relate son voyage au « cœur de son cerveau », où il décrit sa compréhension des mathématiques. Grothendieck avouait qu'il saisissait mal pourquoi les gens ne comprennent pas les maths: selon lui, et David Bessis, ce serait parce qu'ils ont perdu leur confiance d'enfant, de sorte que leur entendement serait entravé par la peur d'échouer.
Il est vrai que le langage des mathématiques est rebutant: les définitions sont arides avant que l'on distingue leur portée! Les mathématiques ne sont pas innées, mais nous aurions tous la faculté de les appréhender si nous avions confiance en nos capacités.
Si l'apprentissage du vélo est plus ou moins difficile, peu de gens échouent et le plaisir de la chevauchée est une récompense. Similairement, c'est une expérience spirituelle très forte de savoir qu'il y a plusieurs types d'infinis, et la compréhension de la preuve diagonale de Cantor requiert de l'attention, mais peu de connaissances mathématiques.
L'auteur témoigne de la possibilité de faire « surgir d'un apparent néant de brumes impalpables » une compréhension voire une découverte mathématique. Dans son expérience, la sensation de « voir » une propriété mathématique est comme la sensation d'une couleur rouge dans la tête. Il peut visualiser lors de rêveries guidées par l'intuition les espaces à quatre ou cinq dimensions. L'auteur ne rejette évidemment pas la nécessité de définitions mathématiques: une définition, l'acte de naissance d'un mot nouveau, est « le guide d'assemblage précis d'une nouvelle image mentale ».
La lecture du livre de David Bessis est un beau voyage en pensée mathématique. Il serait intéressant de savoir si son expérience personnelle est généralisable. Un colloque sur les expériences de création mathématique serait passionnant.

PHILIPPE BOULANGER
Ancien directeur de *Pour la Science*

HISTOIRE DES SCIENCES

PROMESSES DE PATAGONIE
Paz Nuñez-Regueiro

Presses universitaires de Rennes, 2022
312 pages, 26 euros

De tous les peuples autochtones d'Amérique, ceux du Cône sud sont sans nul doute les grands oubliés de la recherche anthropologique. Très longtemps, on a pensé que seuls des barbares avaient habité ce rude bout du monde. Pourtant, quelques scientifiques se sont intéressés aux Fuégiens. Se souvient-on par exemple que les observations de Darwin sur les Yagans, en 1834, servirent à Marx pour concevoir sa théorie du communisme primitif? Au long des pages de ce livre très savant issu de sa recherche doctorale, l'autrice emmène le lecteur dans la passionnante découverte de ces terres australes. On suit ainsi les premières explorations scientifiques de la fin du XIXe siècle jusqu'aux collectes d'objets indigènes au siècle suivant. Elle raconte cette épopée en se servant d'une panoplie de disciplines allant de l'histoire à la muséologie en passant par l'ethnographie.
Alors que le reste de l'Amérique du Sud avait déjà fait l'objet de nombreuses missions scientifiques de découverte, le Cône méridional n'attira l'attention que la veille du XXe siècle. L'autrice évoque les trois principales expéditions pour décrire la révélation de ces groupes d'Amérindiens vivant nus et pêchant dans une eau glaciale. Elle arrête son discours lorsque les – rares – objets collectés entrent dans le palais de Chaillot et que le musée d'Ethnographie disparaît en 1937 pour être transformé en musée de l'Homme. Ce livre met enfin en lumière l'histoire d'artefacts amérindiens et de quelques restes humains venus de ces lieux entre eau et terre et trop longtemps oubliés dans les rayons de sombres réserves muséales. Les «nobles races» de la Terre de Feu retrouvent enfin une partie de leur dignité. Il était temps.

STÉPHEN ROSTAIN
CNRS

NUTRITION

LE CERVEAU CUISINIER
Roland Salesse

Quae, 2022
192 pages, 32 euros

Le mérite de l'auteur, ancien directeur de recherche en biologie moléculaire et neurobiologie à l'Inrae de Jouy-en-Josas, est de nous guider de façon très didactique dans le dédale des mécanismes qui président à l'acte alimentaire. Manger, en effet, est une nécessité. C'est aussi un acte dont la charge émotionnelle, culturelle, identitaire et sociale est constitutionnelle de tout individu. Cela se traduit par des habitudes individuelles et collectives, des goûts et des préférences, des inquiétudes et des interrogations (malbouffe, impacts environnementaux et sanitaires), des addictions et des refus, bref, par de multiples comportements conditionnés par une avalanche d'injonctions souvent contradictoires, qu'elles soient publicitaires, diététiques, morales, idéologiques ou religieuses. Mais comment cet ensemble de ressentis complexes se met-il en place et se régule-t-il? Dans son passionnant ouvrage, l'auteur passe en revue l'ensemble des implications physiologiques (microbiote, génétique, hormones, système nerveux, immunologie), mais aussi neurosensorielles, hédoniques, culturelles et symboliques auxquelles nous sommes soumis. Il les décrit par des pages richement illustrées à l'aide de schémas et par des textes clairs, compréhensibles par tous, que l'on soit professionnel ou pas. Ces multiples afférences internes et externes convergent vers le cerveau, véritable chef d'orchestre qui va les intégrer et les organiser, afin de construire les déterminants de nos choix alimentaires.
Une leçon magistrale sur l'élaboration du goût et un plaidoyer pour l'hédonisme de la table.

BERNARD SCHMITT
Cernh, Lorient

ET AUSSI

BRÈVE HISTOIRE DES ORIGINES DE L'HUMANITÉ
Antoine Balzeau
Tallandier, 2022, 320 pages, 19,90 euros

L'un des paléoanthropologues du Muséum national d'histoire naturelle passe en revue les principaux fossiles et arguments concourant aux récits sur l'émergence et l'évolution d'*Homo*. Il évoque les arguments élaborés par l'imagination des préhistoriens, leur fragilité, mais aussi leur fertilité, ainsi que les nouvelles techniques qui, de la paléogénétique à la ZooMS, ont multiplié les données disponibles pour restituer l'histoire évolutive du rameau humain. Une lecture très instructive pour tous les passionnés de préhistoire.

L'ÉLÉGANCE DES MOLÉCULES
Jean-Pierre Sauvage
Humensciences, 2022, 184 pages, 18,90 euros

« En se formant, puis en évoluant, la vie a su développer des compétences en chimie hors de notre portée… », écrit l'auteur. C'est reproduire cette ingénierie moléculaire qui le passionne d'emblée, alors qu'il est doctorant dans le laboratoire de Jean-Marie Lehn (Prix Nobel de chimie). Il le fera en construisant des molécules, puis des machines moléculaires de plus en plus « vivantes », qui lui vaudront de partager le prix Nobel de chimie avec deux confrères. Dans un petit livre simple et énergique, il retrace ici sa belle carrière avant d'en tirer quelques enseignements essentiels sur le métier de chercheur.

LE MYSTÈRE DE L'ÎLE AUX COCHONS
Michel Izard
Paulsen, 2022, 320 pages, 19,90 euros

Comment une colonie de plus d'un million de manchots royaux a-t-elle pu fondre de 80 % hors de toute présence humaine ? L'auteur – grand reporter chez TF1 – a eu la chance d'accompagner les enquêteurs du Centre d'études biologiques de Chizé, qui se sont brièvement rendus sur l'île aux Cochons dans l'archipel Crozet pour trouver une explication, et il en a fait ce livre. Entre évolutions de la production biologique en mer, rôle éventuel des mouettes skua nécrophages, prolifération des chats laissés par les baleiniers du XIXe siècle… l'enquête ne sera pas conclusive, mais cette évocation de l'un des rares écosystèmes quasiment indemnes d'impacts humains n'en est pas moins fascinante.

La chronique de
CATHERINE AUBERTIN
économiste de l'environnement, directrice de recherche à l'IRD et membre de l'UMR Paloc au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

DES GUERRES CONTRE NATURE

Le conflit en Ukraine, par ses répercussions sur la production agricole, se double d'une guerre contre la nature au nom de la sécurité alimentaire. Quel aveuglement !

L'Ukraine, un champ de bataille pour plusieurs guerres.

En février 2021, Antonio Guerres, secrétaire général des Nations unies, déclarait: «Pendant trop longtemps, nous avons mené une guerre insensée et suicidaire contre la nature.» La pandémie de Covid venait de souligner les liens entre la santé de la planète et celle des humains et des autres vivants. Pourtant, les milliards de dollars des plans de relance ont contribué avant tout à celle de la croissance économique et à atteindre en 2021 un niveau record d'émissions mondiales de CO_2.

Aujourd'hui, cette déclaration reprend tout son sens avec la guerre en Ukraine, que l'on peut aussi analyser comme un conflit pour l'usage des meilleures terres agricoles. En brandissant la menace sur la sécurité alimentaire, sans admettre que celle-ci commence par le maintien de terres en bon état, les politiques et les lobbies de l'agriculture industrielle poursuivent leur guerre contre la nature.

Scientifiques et ONG ont fortement réagi aux déclarations du Commissaire européen à l'agriculture Janusz Wojciechowski: «Si la sécurité alimentaire est en danger, alors nous devons réexaminer les objectifs de la stratégie F2F (*Farm to Fork*, soit "De la fourche à la fourchette") et les corriger [...].»

> On ne nourrira pas le monde avec une nature dévastée

Le F2F, volet agricole du Pacte vert, s'inspire des rapports du Giec et de l'IPBES pointant l'agriculture industrielle comme principale cause des émissions de gaz à effet de serre et de destruction de la biodiversité. Il vise à réduire l'usage des pesticides et des engrais à l'horizon 2030. Il soutient la conversion d'un quart des terres cultivées à l'agriculture biologique et la diminution de 10% de l'emprise agricole.

Bien avant la guerre en Ukraine, les lobbies de l'agrochimie avaient dénoncé un plan de décroissance, estimant une chute jusqu'à 30% de la production agricole par des calculs ne prenant en compte ni l'évolution de la demande ni les innovations agricoles. Le gouvernement français était déjà revenu sur l'interdiction des néonicotinoïdes pour les betteraviers et faisait traîner celle du glyphosate. Puis, au son du slogan «Numérique, Robotique et Génétique» de son plan France 2030, le président a appelé notamment lors du salon de l'agriculture à produire plus.

A-t-on besoin de produire plus quand, dans l'Union européenne, 43% de la biomasse et les deux tiers des surfaces agricoles sont consacrées à l'alimentation animale, contre 13% à l'alimentation humaine, 23% pour les biomatériaux et 20% pour l'énergie, et alors que 20% de la production est perdue par gaspillage?

Produire plus nécessiterait d'augmenter les rendements et étendre les surfaces cultivées. Or les rendements de l'agriculture industrielle ont atteint un plateau. L'utilisation accrue d'intrants dépendants du pétrole et du gaz naturel n'y changerait pas grand-chose, mais aggraverait encore la dégradation des sols, la réduction de la biodiversité et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Quant à l'extension de l'agriculture intensive permise par la commission européenne sur les 4% de jachères prévues par la PAC, elle déstockera du carbone et menacera les surfaces à «haute valeur naturelle» dans les zones de production agricole. Ces coûts seront-ils imputés aux productions?

Et pour qui s'agit-il de produire plus? La sécurité alimentaire est une question d'accès à la nourriture pour les populations à faibles revenus ou victimes de conflits. Quant à «nourrir l'Afrique», il serait opportun de renforcer le programme alimentaire mondial, d'aider à diversifier l'alimentation de base et de réduire la dépendance aux importations dont le prix dépend des spéculateurs et... des guerres. Faut-il répondre à la guerre entre les hommes en intensifiant celle contre la nature? ■

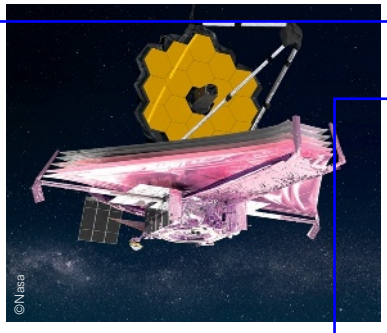
© Delpixel/Shutterstock

cité sciences et industrie

conférences

en direct de l'auditorium — en replay sur cite-sciences.fr — accès libre

En juin, repoussez les limites du ciel ! Venez revivre la formidable aventure de l'exploration spatiale télescopique.

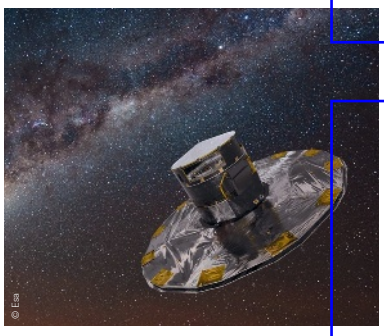


samedi 18 juin de 15h à 18h

Télescope spatial *James-Webb* : un œil neuf sur l'Univers

Le télescope spatial *James-Webb* a atteint son orbite en janvier dernier à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Il a pour missions, entre autres, de repérer les premières étoiles, planètes et galaxies, et d'observer leur évolution, de rechercher les composants essentiels à l'apparition de la vie dans l'atmosphère des exoplanètes.

Avec **D. Elbaz**, CEA ; **É. Habart**, CNRS ; **P.-O. Lagage**, CEA ; **Ph. Laudet**, Cnes ; **L. Leboulleux**, CNRS ; **N. Nesvadba**, CNRS.
Animé par **G. Dawidowicz**, vice-président de la Société astronomique de France (Saf).



samedi 25 juin de 14h30 à 18h30

Gaia, arpenteur de la galaxie

Grâce au satellite européen Gaia, le catalogue d'étoiles de notre galaxie s'est enrichi avec une précision sans précédent ! Quel rôle joue la coopération européenne dans l'établissement de ce catalogue ? Comment est-il réalisé, et dans quel but ? Quelles questions se posent à la lumière de ces nouvelles données ?

Avec **F. Arenou**, CNRS, Observatoire de Paris / PSL ; **D. Hestroffer**, Observatoire de Paris / PSL ; **P. Di Matteo**, Observatoire de Paris / PSL ; **O. La Marle**, Cnes.
Animé par **G. Dawidowicz**, vice-président de la Société astronomique de France (Saf).

Retrouvez le programme et les intervenants sur cite-sciences.fr

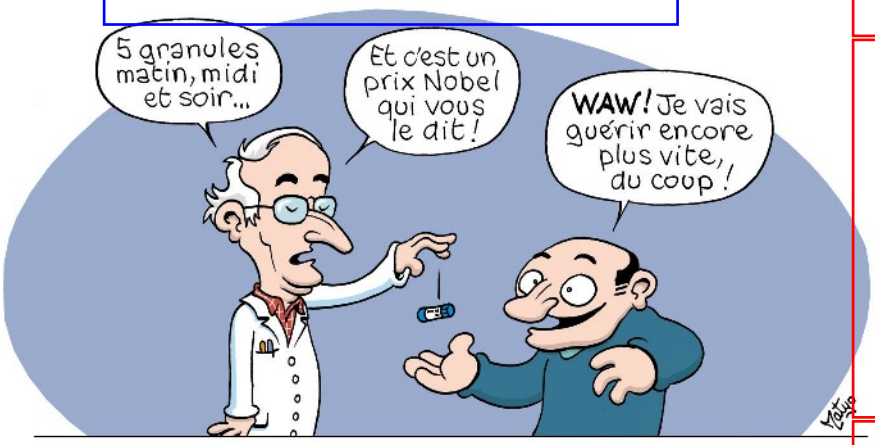
En partenariat avec

Avec le soutien de

La chronique de
YVES GINGRAS
professeur d'histoire et sociologie des sciences
à l'université du Québec à Montréal, directeur scientifique
de l'Observatoire des sciences et des technologies, au Canada

COMMENT DISTINGUER LES EXPERTS DES « EX-PAIRS » ?

En sciences comme ailleurs, l'expertise n'est jamais acquise pour toujours.



On n'aura probablement jamais autant usé du mot « expert » qu'au cours des deux dernières années. L'usage de ce mot semble suffire pour se rassurer sur la crédibilité des dires de la personne à qui on attribue cette qualité et sur le sérieux de ses affirmations.

Il faut cependant distinguer plusieurs catégories : d'abord les vrais experts, jugés crédibles par leurs pairs. Ensuite les « pseudo-experts », sans véritable carrière derrière eux et relativement faciles à débusquer. Enfin il y a celle qui m'intéresse ici et que j'appellerai la catégorie des « ex-pairs ». Ce sont des scientifiques qui jouissent d'une grande autorité – et souvent notoriété – pour leurs contributions scientifiques passées, mais qui, à un moment donné de leur carrière, ont dérapé sérieusement – aux yeux de leurs collègues et pairs à tout le moins – et se sont mis à propager des idées incompatibles avec le consensus scientifique, c'est-à-dire avec l'état actuel des savoirs les mieux validés.

Ces dérapages sont complexes sur le plan psychologique et difficiles à expliquer. Les cas les plus intéressants d'ex-pairs sont ceux qui ont obtenu un prix

> **Le seul critère du prestige associé à un prix ou à certaines affiliations ne suffit pas**

Nobel, reconnaissance qui leur confère une marque suprême de légitimité scientifique. On peut même penser qu'un certain « effet Nobel » contribue parfois à une « fuite en avant » vers la pseudoscience. En effet, chez certains lauréats, l'obtention de cette reconnaissance les amène non seulement à se considérer soudain porte-parole de *la* science, mais aussi, se sentant légitimés dans leur *génie*, à promouvoir des thèses dépassant très largement ce qu'ils sont capables d'avancer de manière plausible. Ils se comparent alors indûment à Galilée, incompris en son temps, et fustigent l'ensemble de la communauté scientifique qui refuse d'admettre leur théorie révolutionnaire.

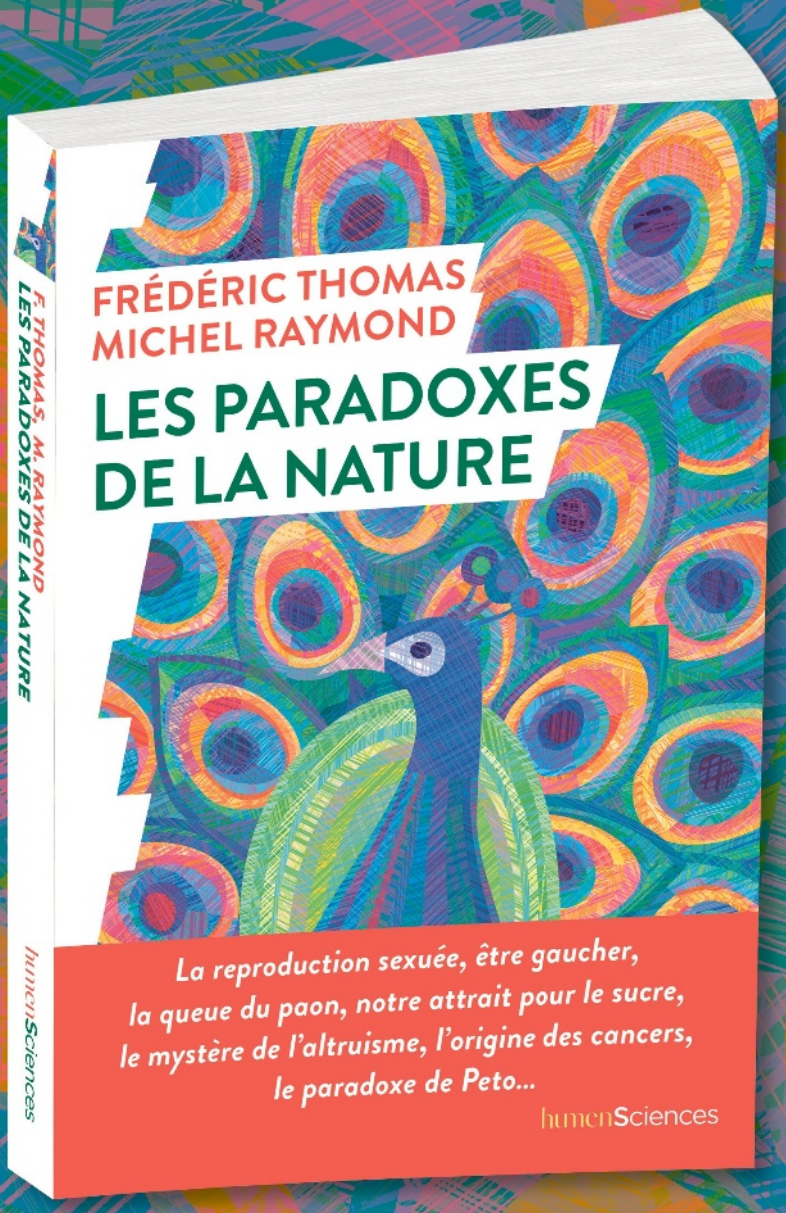
Il arrive que le dérapage du Nobel se produise dans un domaine éloigné de son expertise réelle. Ainsi, Luc Montagnier, récompensé en 2008 – avec sa collaboratrice Françoise Barré-Sinoussi – pour la découverte du virus du sida, a été un ardent promoteur de la « mémoire de l'eau » dans les dix dernières années de sa vie. Cette théorie, jamais établie mais supposée expliquer l'efficacité de l'homéopathie, fait intervenir la physique quantique, science très distante de son domaine d'expertise, la virologie.

Mais d'autres ex-pairs sont plus difficiles à repérer, car ils appuient des idées plus proches de leur discipline. C'est le cas de Brian Josephson, lauréat du prix Nobel de physique en 1973, qui a lui aussi promu la mémoire de l'eau, de même d'ailleurs que la fusion nucléaire « froide ». Annoncé en grande pompe en 1989 par les électrochimistes Stanley Pons et Martin Fleischmann, ce « phénomène » est pourtant considéré comme non reproductible. Ce physicien peut donc sembler plus crédible que Montagnier, mais il rejette en fait l'ensemble des connaissances accumulées en chimie et en physique depuis le XVIII^e^ siècle – une situation peu plausible, car, de nos jours, même une « révolution scientifique » ne remet en cause qu'une petite région du savoir.

En somme, l'ex-pair est le plus difficile à reconnaître et le seul critère du prestige associé à un prix ou à certaines affiliations (CNRS, Harvard, MIT, etc.) ne suffit pas pour accréditer un véritable expert. Pour éviter de confondre expert et « ex-pair », il faut donc se tenir au courant de l'état des connaissances dans le domaine et consulter une grande diversité de spécialistes avant d'en propulser un sous les feux de la rampe. ■

© Matyo

UN MONDE PEUPLÉ D'ÉNIGMES



humenSciences

humensciences.com

À LA UNE

Code correcteur, qubits, changement d'échelle...

ORDINATEUR QUANTIQUE

Les vrais défis

Les principaux acteurs du secteur revendiquent un nombre toujours plus grand de « qubits », les composants fondamentaux de ces machines. Bien des progrès restent cependant nécessaires pour faire de la puissance théorique de ces ordinateurs d'un nouveau genre une réalité industrielle.

ANTOINE TILLOY
est chercheur au centre automatique et systèmes des Mines Paris, au sein de l'université Paris Sciences et Lettres. Il est membre de l'équipe de recherche Quantic (laboratoire de physique de l'École normale supérieure, l'Inria, les Mines et le CNRS). Il s'intéresse à de nombreux aspects de la mécanique quantique, des fondements de la théorie aux applications.

L'ordinateur quantique ne se résume pas à une course aux qubits

Derrière les promesses de l'ordinateur quantique et les effets d'annonce, les défis théoriques et techniques sont encore nombreux. Erreurs, qubits physiques, profondeur de portes, puissance de calcul... Autant de contraintes interconnectées, que les spécialistes cherchent aujourd'hui à alléger pour construire l'ordinateur de demain.

D'année en année, les ordinateurs quantiques semblent régulièrement battre des records. Où en sommes-nous ?

Depuis une dizaine d'années, le rythme s'est accéléré. Un des résultats les plus marquants est probablement l'annonce de Google en 2019, qui a affirmé avoir atteint l'avantage quantique avec son processeur Sycamore contenant 53 qubits physiques. L'avantage quantique (aussi nommé «suprématie quantique») définit le moment où les supercalculateurs classiques ne sont plus capables de réaliser le calcul d'une machine quantique en un temps raisonnable. La course au nombre de qubits continue: fin 2021, l'université chinoise des sciences et des technologies a présenté Zuchongzhi (62 qubits) et IBM son processeur Eagle (127 qubits).

Pour le grand public, ces annonces donnent peut-être l'impression que l'enjeu autour des ordinateurs quantiques se résume à une question de taille, qu'il suffit d'augmenter le nombre de qubits pour obtenir un dispositif qui fera enfin des calculs vraiment utiles. Le problème est en fait plus complexe, car la performance dépend fortement de la qualité des qubits et de leur connectivité. Selon les critères que l'on regarde, une machine avec seulement quelques qubits «propres» et bien connectés sera parfois plus performante qu'une autre avec davantage de qubits plus bruités.

Par exemple, pour Sycamore, Google a trouvé un bon équilibre, combinant des qubits pas trop bruités, en nombre raisonnable, et bien connectés, ce qui a permis au système de réaliser un calcul, certes complètement inutile, mais *a priori* infaisable par un ordinateur classique.

D'ailleurs, l'avantage quantique revendiqué par Google n'est-il pas contesté ?

Absolument, suite à l'annonce, IBM a contesté la «suprématie» en démontrant qu'en utilisant toute la mémoire du plus gros supercalculateur du monde, le calcul de Google était réalisable en quelques jours seulement. Plus impressionnant de mon point de vue, Xavier Waintal, de l'université Grenoble-Alpes et du CEA, et ses collègues de l'institut Flatiron, à New York, ont montré qu'en utilisant une puissante technique de compression (les réseaux de tenseurs), il était possible de reproduire en quelques heures le calcul de Sycamore sans même recourir à un supercalculateur. Néanmoins, je pense que si Google améliorait son processeur d'un facteur 10 (nombre de qubits, réduction des erreurs, etc.), les machines classiques ne pourraient pas suivre pour ce calcul spécifique.

D'où vient la puissance de calcul des ordinateurs quantiques ?

Dans un ordinateur classique, les transistors fonctionnent déjà grâce à la mécanique quantique. Mais, de façon cruciale, l'information reste portée par un bit qui a un comportement classique et prend soit la valeur «0» soit la valeur «1». Dans l'ordinateur quantique, l'information est portée par un bit quantique, ou qubit, qui est une généralisation du bit. Le qubit a intuitivement davantage de degrés de liberté car on autorise une superposition quantique de l'état «0» et de l'état «1». Le qubit peut donc être «à la fois» en «0» et «1», éventuellement même avec des poids complexes (ou amplitudes) différents pour le «0» et pour le «1». Le statut physique de ces superpositions reste intensément débattu. Sont-elles réelles? Sont-elles simplement une représentation mathématique de quelque chose de plus compliqué qui se passe dans le monde réel? Ce qui compte *in fine* c'est qu'on peut exploiter ce comportement que nous prédit le formalisme quantique pour faire des calculs de manière plus rapide.

On simplifie souvent l'explication de la puissance de l'ordinateur quantique en disant que la superposition explore plus vite l'espace des solutions, en testant toutes les possibilités à la fois. On a par exemple en tête l'image du jeu d'échecs. Pour trouver le meilleur coup, un algorithme classique doit étudier une à une toutes les séquences de coups jusqu'à une certaine profondeur. Intuitivement la superposition permettrait d'explorer toutes les options en même temps, et ainsi de résoudre immédiatement le jeu. En réalité, le gain offert par les superpositions reste minimal pour ce type de problèmes, car il est difficile de lire dans l'état quantique le résultat de cette exploration parallèle.

L'origine de la puissance des ordinateurs quantiques est plus subtile et pas totalement comprise. Elle prend racine dans des interférences entre les qubits du système, qui distinguent les amplitudes apparaissant dans les superpositions quantiques de simples probabilités.

Quelles seraient les applications des ordinateurs quantiques ?

De façon assez naturelle, comme une telle machine est profondément quantique, on s'attend à ce qu'elle soit en mesure de résoudre très efficacement des problèmes de physique quantique tels que le «problème à N corps», c'est-à-dire des systèmes physiques constitués d'une collection de particules en interaction. On aurait alors des applications directes pour étudier les propriétés de nouveaux matériaux, de composés chimiques, de supraconducteurs à haute température, de catalyseurs plus performants, etc. Même si on n'a aucune preuve formelle d'un gain par rapport aux ordinateurs classiques...

Pour ce type de questions, on pourrait d'ailleurs peut-être se satisfaire d'un simulateur

QUELQUES RÉSULTATS RÉCENTS

2022 : QuTech
6 qubits
(spins dans le silicium)

2021 : IBM – Eagle
127 qubits
(supraconducteurs)

2021 : IonQ
32 qubits
(ions piégés)

2021 : université chinoise des sciences et des technologies
62 qubits
(supraconducteurs)

2019 : Google – Sycamore
53 qubits
(supraconducteurs)

quantique analogique. Ces systèmes n'ont pas pour vocation d'être universels comme les ordinateurs mais restent suffisamment configurables pour simuler une variété d'évolutions quantiques apparaissant dans la nature. C'est notamment l'option explorée par Pasqal, une start-up issue de l'institut d'Optique, à Palaiseau. Leur dispositif utilise un ensemble d'atomes neutres piégés dont on peut régler les couplages pour mimer le système physique à simuler.

Plus inattendu, les ordinateurs quantiques sont aussi efficaces pour résoudre certains problèmes qui ne sont pas quantiques par essence, comme la décomposition en facteurs premiers de nombres très grands grâce à l'algorithme proposé en 1994 par le mathématicien Peter Shor du MIT (institut de technologie du Massachusetts).

Les promesses et les attentes sont donc grandes. À quel stade de développement sont les ordinateurs quantiques ?

En 2018, le spécialiste de l'informatique quantique John Preskill qualifiait la période actuelle d'« ère des NISQ » (*noisy intermediate-scale quantum era*), c'est-à-dire l'ère des processeurs dotés de cinquante à quelques centaines de qubits, soumis à pas mal d'erreurs non corrigées, on parle aussi de « bruit ».

Dans un ordinateur classique, on peut avoir des erreurs quand un bit change de valeur (*bit flip* en anglais) : un « 0 » peut accidentellement se transformer en « 1 » et inversement. Les qubits aussi sont susceptibles d'avoir des erreurs. Il existe deux types d'erreurs fondamentales : l'inversion de bit, qui correspond à l'erreur classique, et l'inversion de phase (*phase flip* en anglais), qui est purement quantique.

Ces erreurs proviennent d'interactions avec l'environnement et elles sont beaucoup plus fréquentes dans les systèmes quantiques. Il faut donc protéger le mieux possible les qubits de leur environnement. Mais il est impossible d'isoler totalement un système. Les erreurs se produisent ainsi de façon inéluctable.

Le fait de réaliser un calcul induit-il des erreurs ?

Dans un processeur, classique ou quantique, on veut traiter l'information pour faire des calculs. Pour cela, on utilise des portes logiques qui consistent à inverser la valeur d'un bit, additionner la valeur de deux bits, etc. Ces portes sont réalisées avec des transistors.

Dans l'ordinateur quantique, les portes logiques effectuent aussi des rotations dans l'espace des états du qubit (par exemple l'état initial « 0 » devient une combinaison de « 0 » et « 1 »), ou couplent plusieurs qubits voisins.

Les portes logiques ne sont jamais parfaites et introduisent aussi des erreurs, ne serait-ce que parce que le qubit peut être perturbé par son environnement durant l'opération. Une bonne mesure de la qualité du système est la profondeur atteignable, c'est-à-dire le nombre de portes ou opérations que l'on peut faire sur un qubit avant que le calcul ne contienne presque sûrement une erreur.

Que peut-on faire contre ces erreurs ?

Dans le cas classique, le code correcteur le plus simple repose sur la redondance : encoder un bit logique dans plusieurs bits physiques. Le bit « 0 » est dupliqué en « 000 » et 1 en « 111 ». Ainsi si on mesure plus tard « 010 » et qu'on suppose que les erreurs sont rares, on en déduit que la bonne valeur est 0 avec un « vote de majorité », et on peut rectifier le 1 du milieu en 0. Dans un processeur d'ordinateur classique, les codes correcteurs ne sont pas implémentés car les erreurs sont rarissimes. Ils sont en revanche très utiles quand on fait de la transmission d'information, pour communiquer avec un satellite par exemple.

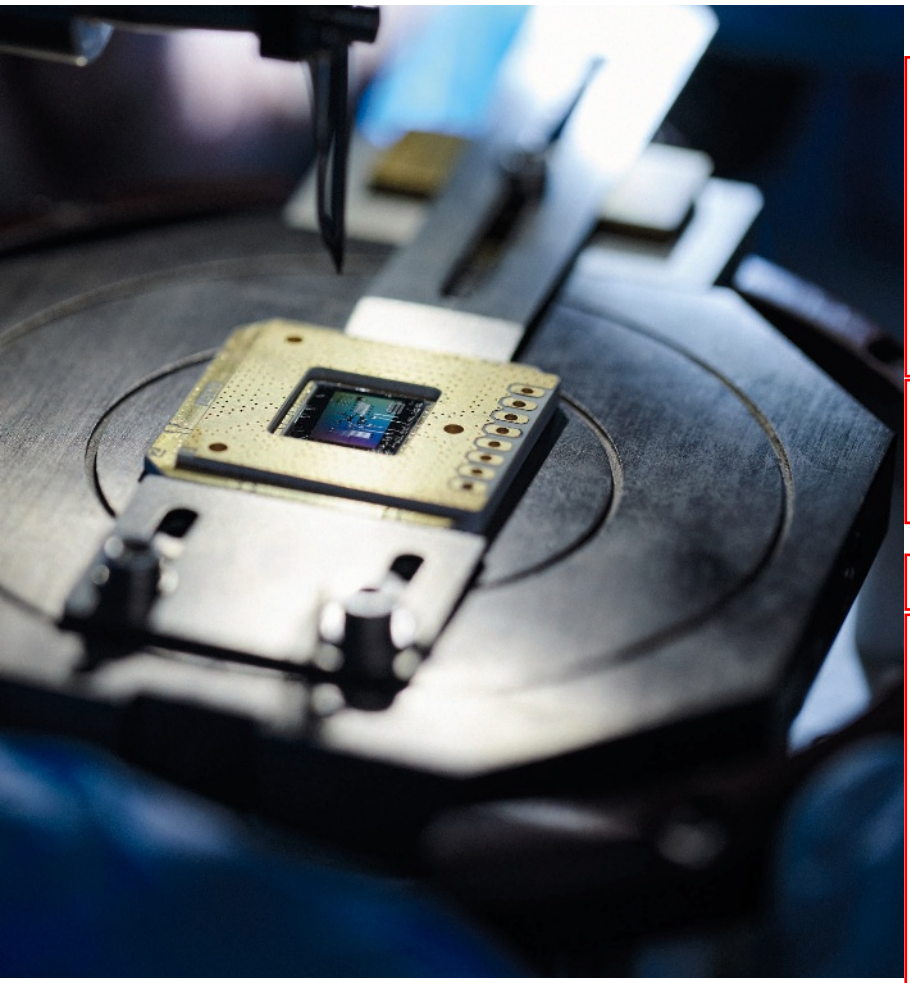
La correction des erreurs de qubits est bien plus difficile à cause de leur nature quantique et du problème de la mesure. Quand on mesure la valeur d'un qubit dans une superposition d'états, on provoque l'effondrement de cette superposition et on n'observe qu'un seul des états possibles. La moindre fuite d'information (comme l'émission d'un photon) qui nous renseignerait sur le système conduit à la destruction de la superposition. Or il faut préserver la superposition des états des qubits tout au long du calcul pour que celui-ci aboutisse. On ne peut ainsi pas simplement mesurer les qubits physiques pour savoir si une erreur s'est produite et la rectifier.

Quelle est alors la solution ?

La solution consiste toujours à encoder l'information d'un qubit dit « logique » de manière redondante dans un plus grand nombre de qubits physiques. L'idée est ensuite de faire d'astucieuses mesures globales qui nous disent si le système contient une erreur (on parle de « syndromes d'erreurs ») et comment la corriger. Ces syndromes sont conçus intelligemment pour ne pas faire fuir d'information sur l'état de superposition du qubit lui-même lorsqu'ils sont mesurés. Pour l'implémentation de ces approches, on fait appel à des codes correcteurs quantiques dont il existe différents types (*voir* Calculer plus vite… et sans erreur ? *page 31*). Un point essentiel est qu'un code correcteur demande toujours une redondance, on utilise plusieurs qubits physiques pour une unité d'information quantique (le qubit logique). Plus on veut réduire les erreurs, plus le rapport du nombre de qubits physiques sur le nombre de qubits logiques (en anglais l'*overhead*) augmente.

La société Alice&Bob explore la piste de qubits de chats, des qubits supraconducteurs dans lesquels il est possible d'éliminer un type d'erreurs. Ici, la puce est intégrée dans le dispositif, qui permet de la connecter et de la refroidir, afin d'en mesurer les caractéristiques.

© Further Studio/Nil Hoppenot



En théorie, on est capable d'améliorer la résistance à toutes les erreurs quantiques à partir de 5 qubits physiques d'assez bonne qualité par qubit logique. En pratique, on ne veut pas juste réduire la probabilité d'erreur, mais rendre les erreurs presque impossibles alors même qu'elles sont encore trop fréquentes au niveau physique. Cela demande des *overheads* beaucoup plus importants, typiquement de l'ordre de 1000 à 10000 qubits physiques bruités par qubit logique. Cette valeur est énorme, car il faut ensuite plusieurs milliers de qubits logiques pour faire tourner des algorithmes intéressants comme celui de Shor.

Y a-t-il des moyens de diminuer le nombre de qubits ?

Avec les machines actuelles, dans l'ère du NISQ, on ne fait simplement pas de correction d'erreur, pour garder un nombre raisonnable de qubits utiles. On se contente d'une profondeur faible où la probabilité d'erreur globale reste acceptable.

Une des grandes questions théoriques est de savoir s'il est possible de faire des calculs utiles avec ces machines NISQ à profondeur limitée. On est raisonnablement confiant sur le fait que les calculs effectués par ces machines sont difficiles ou impossibles pour les ordinateurs classiques (ou en tout cas le seront bientôt) et donc que ces machines sont, en un certain sens, puissantes. Mais on ne sait rien faire d'utile avec. Ça n'enlève rien à l'exploit technologique que représentent les processeurs américains et chinois. Mais il est fort probable que nous ayons atteint les limites de cette approche.

Pour aller plus loin et arriver à des ordinateurs universels capables de mener des calculs utiles, il va falloir réduire les erreurs d'un facteur au moins 1 milliard. Les codes correcteurs d'erreurs deviennent alors indispensables.

Mais comment ne pas faire exploser l'« overhead » ?

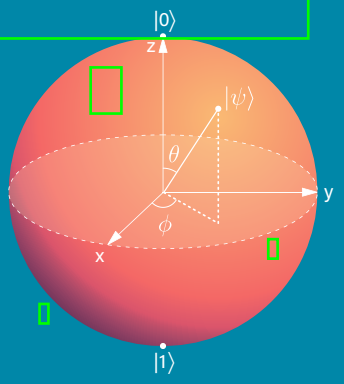
Il existe différentes stratégies. On peut d'abord essayer de perfectionner davantage les codes correcteurs, mais il est peu probable qu'il y ait encore beaucoup à gagner sur ce front. La stratégie qui me semble la plus pertinente sur le long terme consiste à améliorer les supports physiques des qubits. L'idée est de produire des qubits le plus « propres » possible, les plus résistants à certaines formes de bruit grâce à des stratégies de correction passives. Cela n'éliminera jamais totalement les erreurs. Il faudra toujours utiliser des codes quantiques, mais de façon moins massive, et donc avec un *overhead* limité.

Quels sont les différents supports physiques de qubits à l'étude actuellement ?

Pour l'implémentation des qubits physiques, les qubits supraconducteurs sont probablement la technologie la plus mature. De nombreuses équipes ont contribué à leur développement, mais on peut signaler en particulier les travaux précurseurs dans les années 1990 et 2000 de Yasunobu Nakamura, à l'université de Tokyo, et des Français Daniel Esteve et Michel Devoret du CEA-Saclay, ce dernier étant désormais à la tête d'une des toutes meilleures équipes du domaine à l'université Yale.

Pour concevoir un qubit, l'idée la plus simple est de prendre un degré de liberté auquel on peut associer les valeurs « 0 » ou « 1 » et qui est déjà élémentaire, par exemple le spin d'une particule. Au contraire, dans les supraconducteurs, on associe les valeurs « 0 » ou « 1 » à un grand nombre de degrés de liberté microscopiques, correspondant à des paires d'électrons qui circulent dans une boucle supraconductrice dotée d'une jonction Josephson (un élément isolant séparant deux supraconducteurs est traversé par un courant électrique par effet tunnel, c'est l'effet Josephson). Le courant dans le système supraconducteur peut se trouver dans différents

LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE RÉALISATION PHYSIQUE D'UN QUBIT



Représentation d'un qubit d'état quantique $|\psi\rangle$ et de ses deux niveaux $|0\rangle$ et $|1\rangle$.

SUPRACONDUCTEUR

Le qubit est encodé par le courant électrique dans une boucle supraconductrice contenant une jonction Josephson.

- ⊕ Technique mature
- ⊕ Rapidité de calcul
- ⊖ Forte instabilité des qubits
- ⊖ Fragilité élevée

SPIN DANS LE SILICIUM

Le qubit est porté par le spin d'un électron piégé dans une boîte quantique *(quantum dot)*.

- ⊕ S'appuie sur les technologiques industrielles des semi-conducteurs
- ⊕ Stabilité des qubits
- ⊖ Extrême pureté du substrat de silicium
- ⊖ Difficulté à intriquer de nombreux qubits

Pour limiter l'«overhead», il faut des qubits le plus «propres» possible

états, avec différents niveaux d'énergie, que l'on utilise pour définir le qubit.

Un avantage de cette approche est que ce support du qubit ressemble à un circuit électrique usuel, ainsi toute l'électronique de contrôle autour du qubit est relativement standard. La fabrication du circuit électrique bénéficie aussi des progrès en microfabrication. Le passage de quelques qubits à plusieurs milliers, bien que techniquement difficile, ne semble pas insurmontable d'un point de vue physique. Enfin, les qubits supraconducteurs permettent de faire des portes logiques extrêmement rapides, ce qui compense le fait que les erreurs arrivent aussi rapidement. Pour ces raisons, de nombreux laboratoires et industriels, dont Google et IBM, mais aussi l'équipe Quantic, dans laquelle je travaille, ont choisi ce type de support physique.

Une difficulté *a priori* des circuits supraconducteurs est que pour descendre un système aussi gros (constitué de centaines de milliards d'atomes) dans le domaine quantique, il faut le refroidir à des niveaux extrêmes, de l'ordre de quelques dizaines de millikelvins. Heureusement, depuis quelques années, des systèmes de cryogénie atteignant ces températures sont disponibles dans le commerce.

Comment le qubit est-il encodé dans les supraconducteurs ?

Ce qui est intéressant, c'est qu'il existe plein de façons de le faire. La plus classique est le transmon, qui a été développé à l'université Yale en 2007 et qui est une amélioration des « boîtes à paires de Copper », développées au CEA-Saclay dans les années 2000. Pour simplifier, les deux états « 0 » et « 1 » des qubits sont obtenus à partir des deux niveaux de plus basse énergie d'un circuit supraconducteur. Ils correspondent approximativement à la situation où une unité élémentaire de courant circule, ou aucune. C'est une idée désormais assez simple à mettre en œuvre, mais qui pose un problème évident. Rien n'empêche strictement le système de se retrouver dans un niveau d'énergie plus élevé, correspondant à davantage de courant dans le circuit. Le qubit fuit alors hors des états 0 ou 1 vers des états où on ne le contrôle plus, ce qui entraîne une erreur qu'il n'est pas possible de corriger (c'est le problème de *leakage*).

© Pour la Science

IONS PIÉGÉS

Des ions sont piégés dans un champ électromagnétique. L'état électronique des ions définit le qubit.

- ⊕ Température ambiante
- ⊕ Extrême stabilité des qubits
- ⊕ Haute fidélité (taux d'erreurs faible)
- ⊖ Besoin de lasers complexes
- ⊖ Portes logiques lentes

ATOMES NEUTRES

Un ensemble d'atomes sont piégés grâce à des pinces optiques. Le qubit correspond aux niveaux d'énergie des atomes.

- ⊕ Température ambiante
- ⊕ Facile à déployer sur un grand nombre d'atomes : idéal pour des simulations quantiques
- ⊖ Précision limitée des portes logiques
- ⊖ Besoin de lasers complexes

PHOTONIQUE

Manipulation d'un ensemble de photons. Les qubits sont encodés dans la polarisation des photons.

- ⊕ Température ambiante
- ⊕ Rapidité de calcul
- ⊖ Certaines portes logiques (non linéaires) sont difficiles à réaliser
- ⊖ Pertes de photons à corriger

Existe-t-il d'autres façons de définir le qubit supraconducteur ?

Les qubits « de chats » (dont le nom s'inspire directement de l'expérience du chat de Schrödinger) et les qubits GKP (du nom de ses inventeurs, Daniel Gottesman, Andrei Kitaev et John Preskill) sont d'autres solutions plus astucieuses. Au lieu de regarder la pluralité des niveaux et le phénomène de fuite comme un problème, on essaie de profiter de cette liberté supplémentaire pour obtenir un encodage plus robuste.

Les qubits de chats exploitent la pluralité de niveaux pour encoder l'information dans un état complexe extrêmement robuste à une des deux erreurs quantiques. Plus précisément, on sait stabiliser une certaine superposition de niveaux d'énergies dans laquelle la probabilité d'avoir un retournement de bit est exponentiellement réduite. Il est alors possible de supprimer presque entièrement cette première source d'erreur quantique et de n'utiliser un code correcteur que pour la seconde, ce qui réduit drastiquement l'*overhead*.

Les qubits de chats, dans leur incarnation moderne, sont le fruit d'une collaboration entre l'équipe Quantic de Mazyar Mirrahimi (Inria, Mines, ENS) et celle de Michel Devoret et Rob Schoelkopf (Yale). Leur développement est plus récent que celui des transmons, et on est encore loin d'être capable de faire un processeur contenant une cinquantaine de tels qubits. En février 2020, un énorme coup d'accélérateur a été donné avec la création de la start-up Alice&Bob, dont l'objectif est d'effectuer un changement d'échelle de ces qubits, en s'inspirant des prototypes prometteurs de Quantic (réalisés par le groupe de Zaki Leghtas, dans les laboratoires de l'ENS) pour passer à plusieurs dizaines de qubits. L'entreprise bénéficie de moyens importants (elle a levé 27 millions d'euros) et compte des jeunes chercheurs de premier plan comme Jérémie Guillaud (qui a analysé les codes correcteurs pour les qubits de chats lorsqu'il était en thèse à Quantic avec Mazyar Mirrahimi). La concurrence sera rude, car Amazon, qui est entré tardivement dans la course à l'ordinateur quantique, a aussi récemment choisi cette approche.

Les qubits GKP poussent l'idée encore plus loin en utilisant la pluralité des niveaux d'énergie pour obtenir une protection simultanée contre les deux types d'erreurs quantiques. C'est une notion théorique ancienne (2001), très séduisante sur le papier, mais beaucoup plus difficile à implémenter. Sur ce front, l'équipe Quantic travaille principalement à des protocoles plus simples pour réaliser et stabiliser ces qubits. L'effort expérimental du groupe est mené par Philippe Campagne-Ibarcq, qui a contribué à la première réalisation de ce type de qubits supraconducteurs lorsqu'il était dans le groupe de Michel Devoret à Yale. Côté théorique, il y a aussi d'énormes défis, car ces qubits sont difficiles à simuler, ce qui complique la conception des circuits. Pour le moment, la recherche sur les qubits GKP est purement académique.

Quelles sont les pistes en dehors des supraconducteurs ?

Il en existe plusieurs. Les ions piégés sont l'alternative la plus avancée. Ces systèmes ont l'avantage d'avoir des qubits très propres, mais le passage à l'échelle n'est pas évident. Les ions sont suspendus dans le vide grâce à des champs électromagnétiques et manipulés avec des lasers. Il est très compliqué de positionner au bon endroit tous les ions, qui sont disposés en ligne. La société Honeywell explore des configurations en deux dimensions, plus compactes, mais la question de l'alignement est d'autant plus difficile.

Une autre approche utilise des spins dans le silicium. L'institut de recherche QuTech associé à l'université de Delft, aux Pays-Bas, et les équipes du CEA de Grenoble explorent cette approche. Un des gros problèmes est la sensibilité aux impuretés parasites, qui rendent aujourd'hui très difficile de combiner un grand nombre de qubits et des portes logiques de qualité acceptable. L'aspect séduisant de cette approche est que si ces premiers obstacles non négligeables sont dépassés, on peut espérer une mise à l'échelle rapide. En effet, cette filière s'appuie sur l'investissement financier massif et le savoir-faire que l'industrie a engagés dans le développement des semi-conducteurs pour les ordinateurs classiques.

Cette dynamique de rupture est *a priori* assez différente de celle des qubits supraconducteurs, où on imagine une évolution plus linéaire et progressive vers l'ordinateur quantique universel.

Un autre secteur qui pourrait créer la surprise est celui des qubits photoniques. L'information est portée par des photons qui traversent un circuit avec des miroirs semi-réfléchissants, des polariseurs, etc. Dans ce domaine on espère aussi une dynamique de rupture. On pense que si on arrive à fabriquer un ordinateur contenant une poignée de qubits, alors il sera comparativement facile de changer d'échelle et d'en faire des millions. Un des obstacles de cette approche est qu'il n'est pas facile de réaliser certaines portes logiques, qui demandent des phénomènes non linéaires, où les photons interagissent entre eux. La raison est physique, deux photons ne peuvent pas interagir directement avec la force électromagnétique. On peut obtenir de la non-linéarité en utilisant de la matière comme intermédiaire, mais ces non-linéarités sont généralement trop faibles pour fabriquer des portes logiques rapides.

Où en sont les développements des qubits photoniques ?

Une solution a été proposée en 2001 par les physiciens Emanuel Knill, Raymond Laflamme, et Gerard Milburn. L'idée est d'exploiter la non-linéarité de la mesure quantique pour synthétiser des portes logiques à partir de portes linéaires. On introduit des photons auxiliaires, qui sont mélangés aux autres photons, puis interceptés en cours de route. On ajuste les opérations linéaires sur les photons restants en fonction des résultats de mesure sur les photons auxiliaires. Il faut être rapide, bien synchronisé, car pendant ce temps de décision, les photons se déplacent à la vitesse de la lumière. L'*overhead* en termes de photons auxiliaires sacrifiés est très élevé avec l'approche originelle. La société PsiQuantum, qui explore cette voie, a levé plus de 600 millions de dollars et a publié quelques pistes théoriques d'amélioration. Mais très peu d'information filtre sur leur état d'avancement réel.

Comment voyez-vous l'évolution du domaine dans les années à venir ?

Je suis assez sceptique sur le fait qu'on réussira à trouver une réelle utilité aux NISQ, c'est-à-dire aux ordinateurs quantiques se voulant universels mais à profondeur limitée par les erreurs. À court terme, il vaut probablement mieux regarder du côté des simulateurs non universels avec un très grand nombre de qubits, qui pourraient être intéressants pour simuler des matériaux quantiques et servir de bancs de test pour les meilleurs codes de simulation classique. À plus long terme, je pense que si on réussit à faire un ordinateur quantique universel utile (ce qui n'est pas garanti), ce sera avec des qubits au moins partiellement protégés, permettant une correction d'erreur avec un *overhead* raisonnable. Si ces ordinateurs quantiques universels arrivent dans moins de dix ans, ce qui est très improbable, c'est qu'une des approches de rupture comme le silicium ou les qubits photoniques aura miraculeusement fonctionné. Si la progression est plus linéaire, et que les ions piégés et les qubits supraconducteurs restent les meilleures plateformes, comme on s'y attend, les délais pourraient être bien plus longs... ■

Propos recueillis par Sean Bailly

Les spins dans le silicium pourraient bénéficier d'un effet de rupture technologique

BIBLIOGRAPHIE

S. G. J. Philips *et al.*, **Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon**, prépublication arXiv, 2022.

P. Campagne-Ibarcq *et al.*, **Quantum error correction of a qubit encoded in grid states of an oscillator**, *Nature*, 2020.

F. Arute *et al.*, **Quantum supremacy using a programmable superconducting processor**, *Nature*, 2019.

M. Mirrahimi *et al.*, **Dynamically protected cat-qubits : A new paradigm for universal quantum computation**, *New Journal of Physics*, 2014.

D. Gottesman *et al.*, **Encoding a qubit in an oscillator**, *Physical Review A*, 2001.

L'ESSENTIEL

> Pour corriger les erreurs qui surviennent dans les ordinateurs quantiques, les codes correcteurs classiques sont inutilisables.

> Les spécialistes ont développé des stratégies qui nécessitent d'ajouter des qubits. On distingue alors les qubits logiques (qui portent l'information) de l'ensemble des qubits physiques.

> Pour réaliser des opérations sur les qubits, ces derniers sont manipulés par des « portes logiques », qui introduisent aussi des erreurs.

> Il faut trouver un compromis entre le nombre de qubits à utiliser et la quantité d'erreurs que l'on veut maîtriser.

L'AUTRICE

ZAIRA NAZARIO
physicienne théoricienne au centre de recherche IBM Watson, aux États-Unis

Calculer plus vite… et sans erreurs?

Les lois de la physique qui rendent les ordinateurs quantiques si puissants sont aussi à la source de leur grande fragilité. Des techniques toujours plus performantes sont indispensables pour corriger les erreurs plus rapidement qu'elles ne s'accumulent.

© Alice Mollon

Il existe un principe en physique quantique qui stipule que tout ce qui n'est pas interdit doit se produire (mais peut-être avec une probabilité ridiculement petite). Les erreurs sont donc une fatalité dans tous les domaines. On en retrouve dans le langage, la cuisine, la communication, le traitement des images et, bien sûr, le calcul. Pour que la société fonctionne correctement malgré ces erreurs, il est par conséquent indispensable de les contrôler et de les corriger. De nombreuses méthodes ont été développées, et ainsi un DVD rayé reste lisible, un QR code chiffonné est toujours déchiffrable ; les sondes spatiales transmettent des clichés de planètes lointaines sur des centaines de millions de kilomètres et le signal n'en demeure pas moins net. La correction des erreurs est l'un des outils les plus essentiels des technologies de l'information. Les erreurs sont peut-être inéluctables, mais elles sont aussi réparables.

Actuellement, les meilleures machines commettent une erreur toutes les 1000 portes

Cette loi de l'inévitabilité touche également les ordinateurs quantiques. Ces machines exploitent les règles fondamentales de la physique pour résoudre des problèmes que les ordinateurs classiques ne parviennent pas à résoudre de façon efficace. Ces dispositifs ont connu un intense développement ces dernières années et auront certainement un impact très fort sur la science et l'industrie de demain. Mais cette grande puissance s'accompagne d'une grande vulnérabilité. Les ordinateurs quantiques souffrent en effet d'erreurs que les techniques de correction standard ne sont pas en mesure de traiter.

Au début de ma carrière, en tant que physicienne théoricienne de la matière condensée, je me suis intéressée à certains comportements quantiques dans les matériaux. J'ai notamment étudié la supraconductivité, un phénomène associé à certains matériaux refroidis à une température proche du zéro absolu dans lesquels la résistance électrique devient nulle. À l'époque, mes préoccupations étaient bien éloignées de celles des ordinateurs quantiques.

Ces derniers en étaient alors encore à leurs balbutiements. Paul Benioff, du laboratoire américain Argonne, en avait proposé le principe en 1980, mais les premiers prototypes ont été construits près de vingt ans plus tard. En 2007, une découverte a eu un rôle clé dans le développement du domaine. Robert Schoelkopf, Michel Devoret et leurs collègues de l'université Yale ont mis au point une technique reposant sur la supraconductivité pour concevoir des ordinateurs quantiques. De nombreuses entreprises (IBM, Google, etc.) ont vite adopté cette approche pour créer leurs propres ordinateurs quantiques. Forte de mon expérience en matière de supraconductivité, j'ai rejoint IBM où je me suis consacrée à l'amélioration des opérations entre plusieurs qubits reliés entre eux et à l'étude des moyens de corriger les erreurs.

Le qubit est la version quantique du bit d'information classique qui prend la valeur «0» ou «1». Le qubit exploite un phénomène quantique, la superposition des états : il est une combinaison de l'état «0» et de l'état «1». En associant des qubits grâce à l'intrication quantique (*voir l'encadré page 33*), nous pouvons manipuler collectivement de plus grandes quantités d'information qu'un nombre équivalent de bits classiques. À cause de leur nature quantique, les qubits se comportent comme des ondes, qui interfèrent à la manière des ondes lumineuses. Ces interférences conduisent à des capacités de calcul bien plus riches que les simples inversions de bits classiques. Pour ces raisons, les spécialistes pensent que l'ordinateur quantique devrait effectuer certaines tâches bien plus efficacement qu'un ordinateur classique. Entre autres, la simulation de systèmes quantiques réels, la conception et l'analyse de nouveaux matériaux, la découverte de motifs cachés dans de vastes bases de données pour améliorer l'apprentissage automatique, ou la recherche de catalyseurs plus performants sur le plan énergétique pour les processus chimiques industriels.

DIMINUER LE NOMBRE DES ERREURS

Le souci est que de nombreuses propositions visant à résoudre des problèmes utiles exigent que les ordinateurs quantiques effectuent des milliards d'opérations logiques (mises en œuvre électroniquement par ce qu'on nomme des «portes logiques») sur des centaines ou des milliers de qubits. Pour réaliser une telle prouesse, cela exige du système qu'il fasse au maximum une seule erreur par milliard de portes. Or, actuellement, les meilleures machines commettent une erreur toutes les 1000 portes. Face à l'écart considérable

entre la théorie et la pratique, les physiciens ont d'abord pensé que l'informatique quantique ne resterait qu'une curiosité scientifique.

La donne a changé en 1995, lorsque Peter Shor, des laboratoires Bell, aux États-Unis, et, indépendamment, Andrew Steane, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, ont mis au point la correction quantique des erreurs. Ils ont montré comment les chercheurs peuvent répartir la valeur d'un seul qubit d'information sur plusieurs qubits physiques, afin de construire des ordinateurs quantiques fiables à partir de composants peu fiables. Tant que les qubits physiques sont d'une qualité suffisante pour que leur taux d'erreur soit inférieur à un certain seuil, il est possible de corriger les erreurs plus vite qu'elles ne s'accumulent.

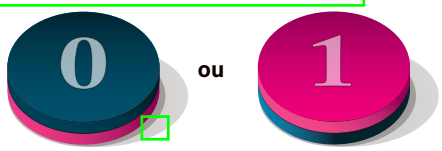
Pour comprendre pourquoi les travaux de Peter Shor et d'Andrew Steane ont constitué une telle avancée, il faut d'abord examiner comment fonctionne généralement la correction d'erreurs ordinaire. Un code correcteur d'erreurs simple effectue des copies de l'information, par exemple en représentant le 0 par 000 et le 1 par 111. Grâce à cette redondance, si votre ordinateur lit un 010, il conclut que la valeur originale était probablement 0. Un tel code reste robuste tant que le taux d'erreur est assez faible pour qu'au plus une copie du bit soit erronée. La stratégie générale consiste à

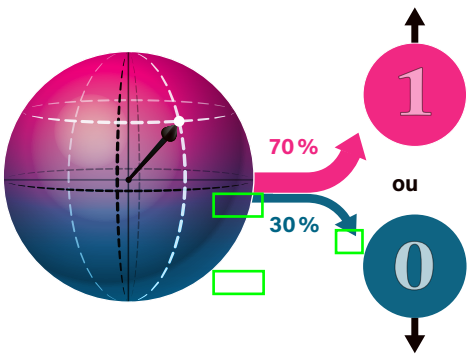
DES BITS AUX QUBITS

L'ordinateur quantique exploite les règles de la mécanique quantique pour dépasser les capacités des machines classiques. Les qubits, l'unité d'information de ces systèmes, peuvent être dans une « superposition » de différents états. Un phénomène quantique, l'intrication, permet aux propriétés des qubits d'être fortement corrélées – si vous avez deux qubits intriqués et que vous mesurez individuellement leurs propriétés, vous obtenez des résultats aléatoires, mais si vous les regardez ensemble, vous constatez que l'état d'un qubit est lié à l'état de l'autre qubit. Des qubits intriqués contiennent davantage d'information que deux qubits séparés.

Des bits…

Un bit classique prend une des deux valeurs : 0 ou 1, à l'image des côtés d'une pièce.



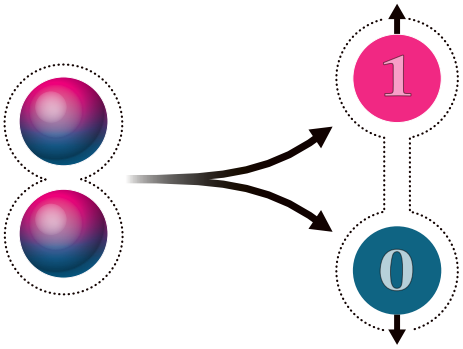


… aux qubits…

Un qubit, lui, a bien plus d'états possibles. On les représente comme tous les points à la surface d'une sphère de rayon unité. Le pôle nord serait ici l'état 1, tandis que le pôle sud serait l'état 0. Pour tous les autres points de la sphère, le qubit est dans une superposition de ces deux états. Les coordonnées d'un point de la sphère indiquent le « poids » que représentent les états 0 et 1 dans le qubit. Elles sont aussi liées à la probabilité de mesurer l'état 0 ou l'état 1 quand on observe le qubit. En effet, lors d'une mesure, la superposition s'effondre. Le qubit prend alors la valeur 0 ou 1, comme un bit classique. Pour exploiter les capacités de l'ordinateur quantique, il faut préserver l'état de superposition pendant tout le calcul.

… aux qubits intriqués

Si deux qubits sont intriqués, leurs états ne sont plus indépendants ; ils sont fortement liés. Quand on mesure l'état d'un qubit intriqué, on sait instantanément dans quel état se trouve l'autre qubit sans même avoir à le mesurer. Cet effet persiste peu importe la distance qui sépare les deux qubits.



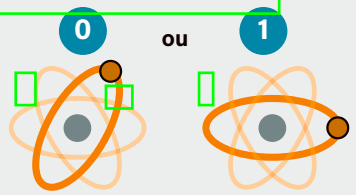
© Jen Christiansen

CIRCUITS QUANTIQUES

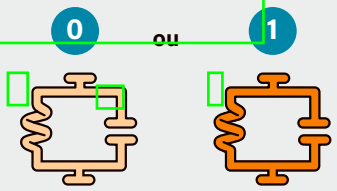
Les circuits quantiques sont des représentations abstraites de l'informatique quantique, analogues aux circuits de l'informatique théorique classique. Avec ces diagrammes, on met de côté les aspects physiques du système (peu importe ici que les qubits soient portés par des circuits supraconducteurs ou autre) et on se concentre sur les opérations de manipulation des qubits.

Un ordinateur quantique peut être réalisé de différentes façons, le qubit est alors représenté par diverses propriétés du système. Trois exemples d'approches.

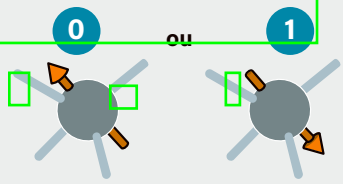
Ion
L'orbite électronique définit le qubit



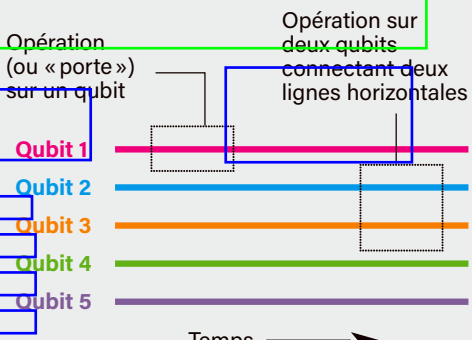
Supraconducteur
La superposition de différents états de charge du circuit définit le qubit



Spin dans la matière
Le spin d'un atome dans un réseau définit l'état quantique

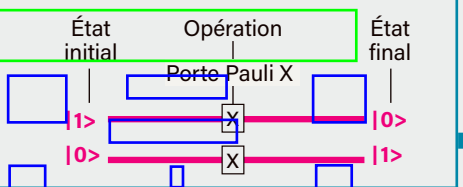


Peu importe la réalisation physique, les opérations peuvent toujours être représentées par le même type de diagrammes, les circuits quantiques.
Ils ressemblent à des partitions musicales. Chaque ligne horizontale représente un qubit. Les « notes » représentent les opérations, on parle de « portes logiques ». Comme pour la musique, la progression dans le diagramme est temporelle. Elle montre la séquence des opérations que l'on applique aux différents qubits.

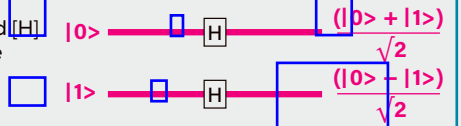


Différentes opérations sont représentées par différents symboles pour les portes.

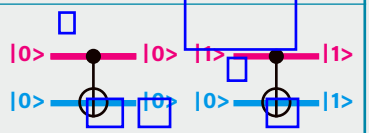
Un *bit flip* (nommée la porte « Pauli-X », et notée [X]) inverse un qubit. Il transforme un 1 en 0, et inversement.



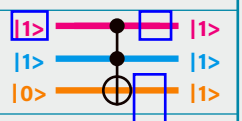
Une porte de Hadamard [H] place un qubit dans une superposition.



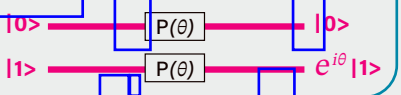
Si deux qubits sont connectés par une ligne verticale, l'inversion du second est conditionnée par la valeur du premier. La porte est dite « contrôlée ».



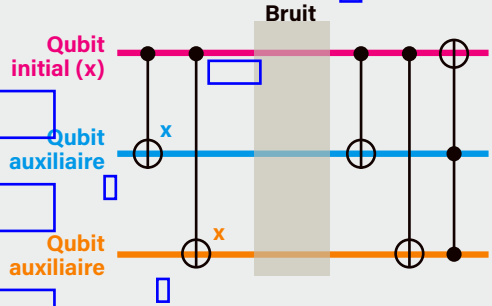
Une porte d'inversion contrôlée qui implique trois qubits est nommée « porte de Toffoli ».



Une porte peut également modifier la phase du qubit d'un angle arbitraire [$P(\theta)$].



Chaque porte présente un taux d'erreur – la probabilité que le système physique qui réalise la porte donne une mauvaise valeur, de la même façon qu'un musicien risque de jouer une fausse note. En l'absence d'un système de correction des erreurs, un circuit livre un mauvais résultat avec une probabilité proportionnelle au taux d'erreur des portes : le nombre de fausses notes devient alors si grand qu'on ne reconnaît plus le morceau de musique. Grâce à des qubits auxiliaires, il est possible de détecter la présence d'erreurs et de les corriger. Ci-contre, un exemple simple de circuit corrigeant les erreurs. Pour un qubit d'information, il nécessite trois qubits. Le circuit compare des paires de qubits. Une paire indique qu'une erreur s'est produite, deux paires indiquent où elle s'est produite, et la porte de Toffoli applique la correction. Avec cette stratégie, on extrait l'information sur l'erreur sans révéler l'information quantique du qubit.



rendre le matériel aussi fiable que possible, puis à ajouter une couche de redondance pour éliminer les erreurs résiduelles.

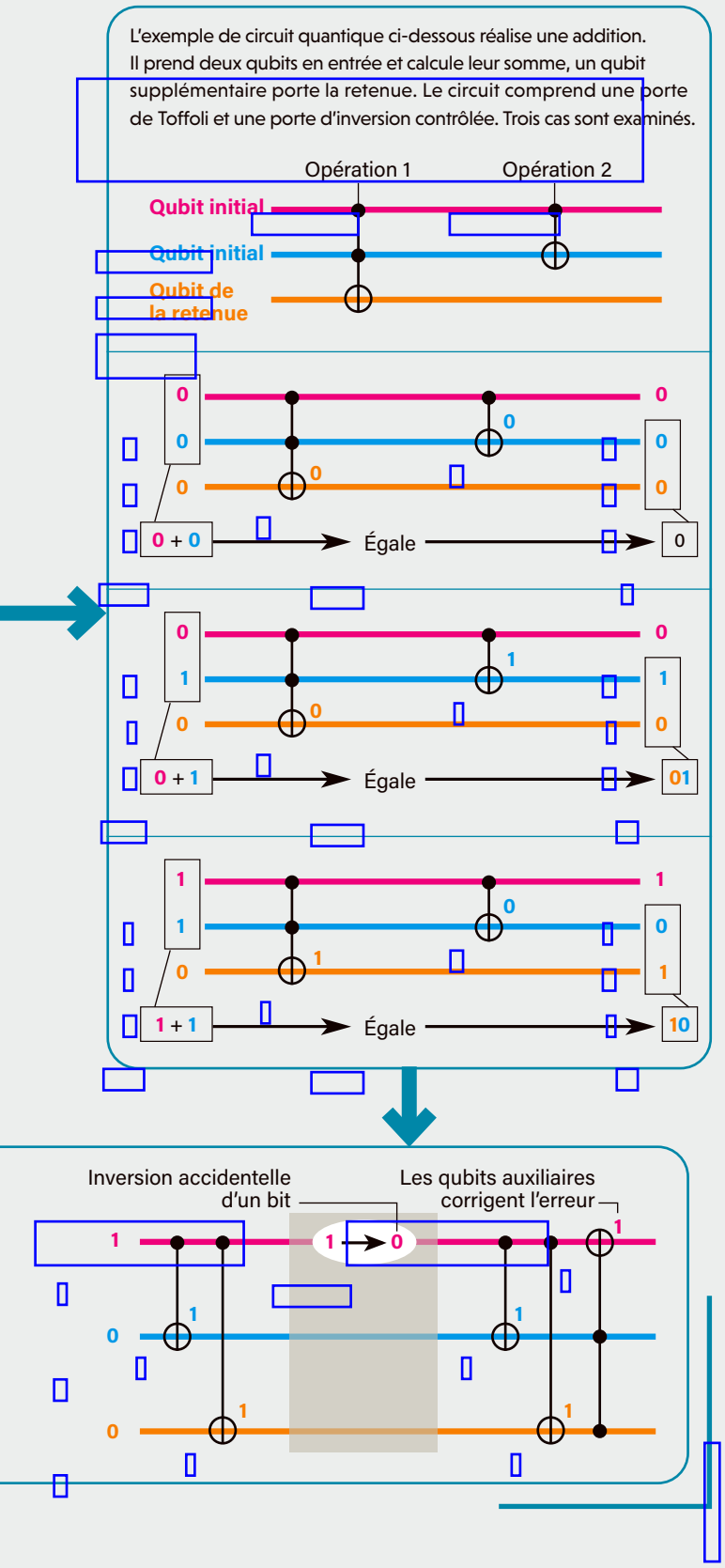
Il existe de nombreux codes correcteurs plus ou moins optimisés. Cependant, il était difficile de voir comment adapter ces méthodes classiques aux ordinateurs quantiques. En effet, un théorème stipule que l'information quantique ne peut être clonée, c'est-à-dire qu'il est impossible de copier à l'identique un état quantique inconnu. Cela supposerait de mesurer l'état avant de le dupliquer ; mais quand on mesure un système quantique, on détruit la superposition des états et un seul état est mesuré. Or toute la puissance de ces dispositifs repose dans la préservation de la superposition des états. Autre difficulté, les qubits subissent deux types d'erreurs : la première est équivalente à celle des bits classiques, la valeur du bit s'inverse, un 0 devient un 1, par exemple ; la seconde est spécifique et influe sur la phase des ondes qui décrivent les qubits.

DES QUBITS AUXILIAIRES À LA RESCOUSSE

Pour résoudre tous ces problèmes, les stratégies de correction des erreurs quantiques utilisent des qubits auxiliaires. Ceux-ci sont intriqués avec les qubits initiaux. Quand deux qubits sont intriqués, leurs propriétés sont fortement corrélées. L'idée est de transférer le bruit du système (les erreurs) aux qubits auxiliaires. Une mesure directe des qubits auxiliaires révélerait l'état du qubit initial, ce qui détruirait la superposition des états. Cependant, il est possible de réaliser des mesures indirectes de sorte à interroger le système pour savoir s'il contient une erreur ou non, mais sans livrer d'information sur l'état du système. Cette stratégie donne assez d'indices pour éventuellement corriger le système.

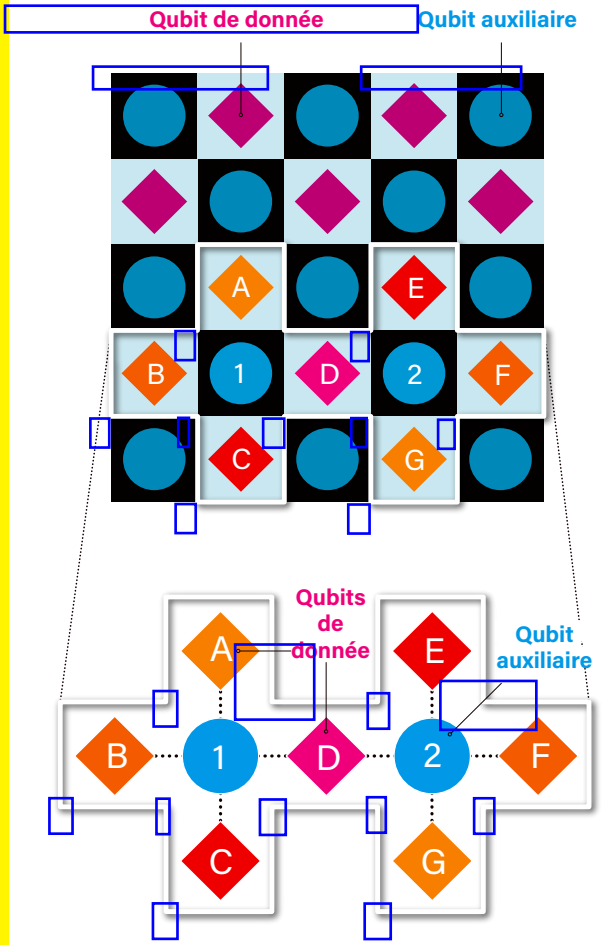
Comme pour la correction classique des erreurs, le succès dépend de la nature du bruit. Pour les ordinateurs quantiques, les erreurs surviennent lorsque le système quantique interagit et s'intrique avec l'environnement. Pour que l'ordinateur opère de façon efficace, le rythme d'accumulation des erreurs physiques doit être faible. On définit alors une valeur critique. En dessous de ce seuil, il est possible de corriger les erreurs pour rendre arbitrairement faible la probabilité qu'un calcul échoue. Au-dessus de ce seuil, le matériel introduit des erreurs à une vitesse trop élevée pour être corrigées. Ce changement de comportement en fonction d'un seuil est typiquement ce qu'on nomme en physique une transition de phase entre un état ordonné et un état désordonné. Spécialiste de la matière condensée ayant passé la majeure partie de ma carrière à étudier des transitions de phases quantiques, ce constat m'a fascinée.

L'exemple de circuit quantique ci-dessous réalise une addition. Il prend deux qubits en entrée et calcule leur somme, un qubit supplémentaire porte la retenue. Le circuit comprend une porte de Toffoli et une porte d'inversion contrôlée. Trois cas sont examinés.

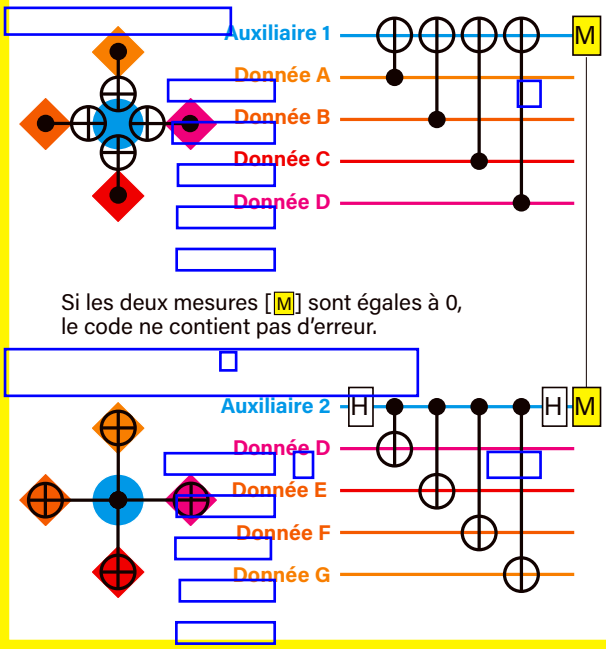


© Jen Christiansen

Configuration du code de surface



Détection d'erreur



Le défi aujourd'hui est donc de trouver des moyens pour améliorer les codes correcteurs afin qu'ils puissent gérer des taux d'erreurs plus élevés, une plus grande variété d'erreurs et s'adapter aux contraintes du matériel.

Les codes correcteurs d'erreurs les plus populaires sont les « codes quantiques topologiques ». Leur origine remonte à 1982, lorsque Frank Wilczek, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, a proposé que l'Univers pouvait contenir une toute nouvelle catégorie de particules. Contrairement aux types connus, dont le spin a une valeur entière (comme le photon) ou demi-entière (comme l'électron), ces particules auraient des valeurs fractionnaires intermédiaires (mais elles n'existeraient que dans des géométries bidimensionnelles). Le physicien les a nommées « anyons » et pensait que les applications pratiques de ces objets étaient probablement lointaines.

DES ANYONS POUR LA CORRECTION

Mais les physiciens ont vite découvert que les anyons n'étaient pas si inutiles que cela. En fait, ils sont liés à des phénomènes du monde réel, dans certains systèmes de matière condensée. Pour achever leur passage de la théorie aux besoins pratiques de la technologie, Alexei Kitaev, de Caltech (l'institut de technologie de Californie), a constaté que les anyons constituaient un outil efficace pour exprimer certains calculs quantiques. Il a alors montré qu'ils avaient une application directe dans des systèmes qui manipulent un grand nombre de particules pour en faire un code quantique.

Dans ces systèmes, les particules sont connectées dans un réseau bidimensionnel où leur état d'énergie le plus bas est fortement intriqué. Les erreurs correspondent à des états d'énergie plus élevée du système, on parle d'excitations. Ces excitations sont représentées par des anyons. Ces idées ont marqué la naissance des codes topologiques (et avec eux, un autre pont entre le calcul quantique et la physique de la matière condensée). Comme le bruit est censé agir localement sur le réseau et que les codes topologiques ont des excitations localisées, ils sont rapidement devenus le système préféré pour protéger les informations quantiques.

Le « code de surface » (ou « code de Kitaev ») et le « code de couleur » sont deux exemples de codes topologiques. Le premier a été développé par Alexei Kitaev et Sergey Bravyi, un de mes collègues chez IBM. Le code de surface est composé des qubits initiaux portant l'information et de qubits auxiliaires, disposés de façon alternée sur un carré bidimensionnel, comme sur un échiquier, les premiers occupant les cases blanches, les seconds les noires.

© Jen Christiansen

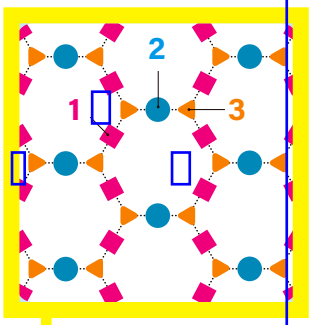
La théorie qui sous-tend les codes de surface est convaincante, mais lorsque nous avons commencé à les mettre en application chez IBM, nous avons rencontré des difficultés. Pour comprendre ces obstacles, il faut d'abord préciser le fonctionnement des qubits que nous utilisons. Il s'agit de transmons, un type de qubits supraconducteurs, qui reposent sur des courants électriques qui oscillent dans un circuit de matériaux supraconducteurs. Le qubit est défini par la superposition des états «0» et«1», correspondant à différentes charges électriques du circuit. Pour effectuer des opérations sur un qubit, nous émettons des impulsions d'énergie à une fréquence microonde spécifique. Lors de sa conception, chaque qubit est réglé pour être réceptif à une fréquence donnée, de sorte à pouvoir atteindre individuellement chaque qubit sans perturber ses voisins. Mais le système n'est pas parfait: la fréquence s'écarte parfois de la valeur prévue; les gammes de fréquences des impulsions se chevauchent de sorte qu'un signal destiné à un qubit modifie de temps en temps la valeur d'un qubit voisin (on parle de diaphonie ou de *crosstalk*). La forte densité de la grille du code de surface, où chaque qubit est connecté à quatre autres qubits, provoque un trop grand nombre de ces collisions de fréquences.

DES ÉCHIQUIERS AUX COLONS DE CATAN

Pour résoudre ce problème, notre équipe a décidé de connecter chaque qubit à un nombre plus faible de voisins. Le résultat est un réseau hexagonal qui ressemble plus à la configuration du jeu de plateau Catan qu'à un plateau d'échecs. Ce système réduit efficacement le *crosstalk*. Mais avec cette nouvelle configuration physique, l'équipe des théoriciens d'IBM a dû développer le code correcteur correspondant.

Ce nouveau code, nommé «code hexagonal lourd», combine certaines caractéristiques du code de surface et d'un autre, le code Bacon-Shor, également conçu pour les réseaux bidimensionnels. La connectivité plus faible des qubits dans notre code signifie que certains qubits doivent servir d'intermédiaires pour identifier les erreurs qui se sont produites, ce qui conduit à des circuits légèrement plus complexes et donc à un seuil où le bruit n'est plus contrôlé un peu plus faible. Nous avons constaté que le compromis entre une diminution du *crosstalk* et un seuil moins bon était satisfaisant.

Il reste un autre problème à résoudre. Les codes qui vivent sur des plans bidimensionnels et qui n'intègrent que les connexions entre voisins les plus proches ont besoin de beaucoup de qubits physiques pour définir un seul qubit logique (ce rapport est désigné par le terme anglais d'*overhead*). Le qubit logique correspond à l'unité d'information intéressante que l'on veut protéger contre les erreurs et les qubits physiques sont les éléments matériels qui opèrent ensemble pour définir le qubit logique et pour garantir qu'il ne contient pas d'erreur. Pour corriger davantage d'erreurs, il faut construire un code plus grand, qui utilise encore plus de qubits physiques pour créer un seul qubit logique. Il est donc nécessaire de manipuler plus de composants physiques pour au final traiter la même quantité de données. Mais l'ajout de matériel rend d'autant plus difficile la maîtrise de qubits de bonne qualité pour ne pas dépasser le seuil d'erreurs.



Les ingénieurs quantiques ont deux options. Première piste, ils acceptent ce large *overhead* – avec un nombre élevé de qubits et de portes logiques – comme le prix à payer pour garder une architecture simple. Et ils s'échinent à comprendre et optimiser les différents facteurs qui y contribuent. Ou alors, ils cherchent un code plus efficace. Par exemple, pour coder plus de qubits logiques à partir d'un nombre plus réduit de qubits physiques, une solution serait de faire interagir des qubits plus éloignés les uns des autres. Pour dépasser la limite du contact aux seuls voisins les plus proches dans le réseau à deux dimensions, il faudrait considérer des réseaux à trois dimensions, ou plus. Notre équipe explore les deux stratégies.

Un ordinateur quantique ne sera vraiment utile que lorsqu'il sera en mesure d'effectuer toutes les opérations de calcul possibles. On oublie souvent ce critère d'universalité, ce qui conduit à de nombreuses confusions sur l'informatique quantique. En d'autres termes, tous les dispositifs que les gens nomment «ordinateurs» quantiques ne sont pas vraiment des ordinateurs. La plupart s'apparentent davantage à des machines à calculer capables de réaliser un nombre limité de tâches.

Le fait de négliger la nécessité d'un calcul universel est également à l'origine de faux espoirs concernant les qubits logiques et la correction d'erreurs. Protéger les informations en mémoire contre les erreurs est un début, mais cela ne résout pas tous les problèmes. Pour obtenir un ordinateur quantique universel, il faut savoir construire un certain nombre de portes logiques différentes. Combinées entre elles, elles sont susceptibles de réaliser toutes les opérations logiques imaginables. Mais ces portes doivent, elles aussi, être robustes contre les erreurs. C'est là que les choses se compliquent.

Certaines portes, appartenant à la catégorie des portes dites «transverses», sont relativement robustes. Quand vous appliquez l'opération d'une porte logique transverse sur un qubit logique, vous devez appliquer cette même opération à chacun des qubits physiques associés. Quand une telle porte opère entre

à lire

THEMA
L'ordinateur quantique

Fabrication des qubits, techniques de calcul, cryptographie, simulation et mémoires quantiques : dix articles pour faire le point sur l'ordinateur de demain.

En vente sur notre site uniquement :
https://rebrand.ly/Thema

© Jen Christiansen

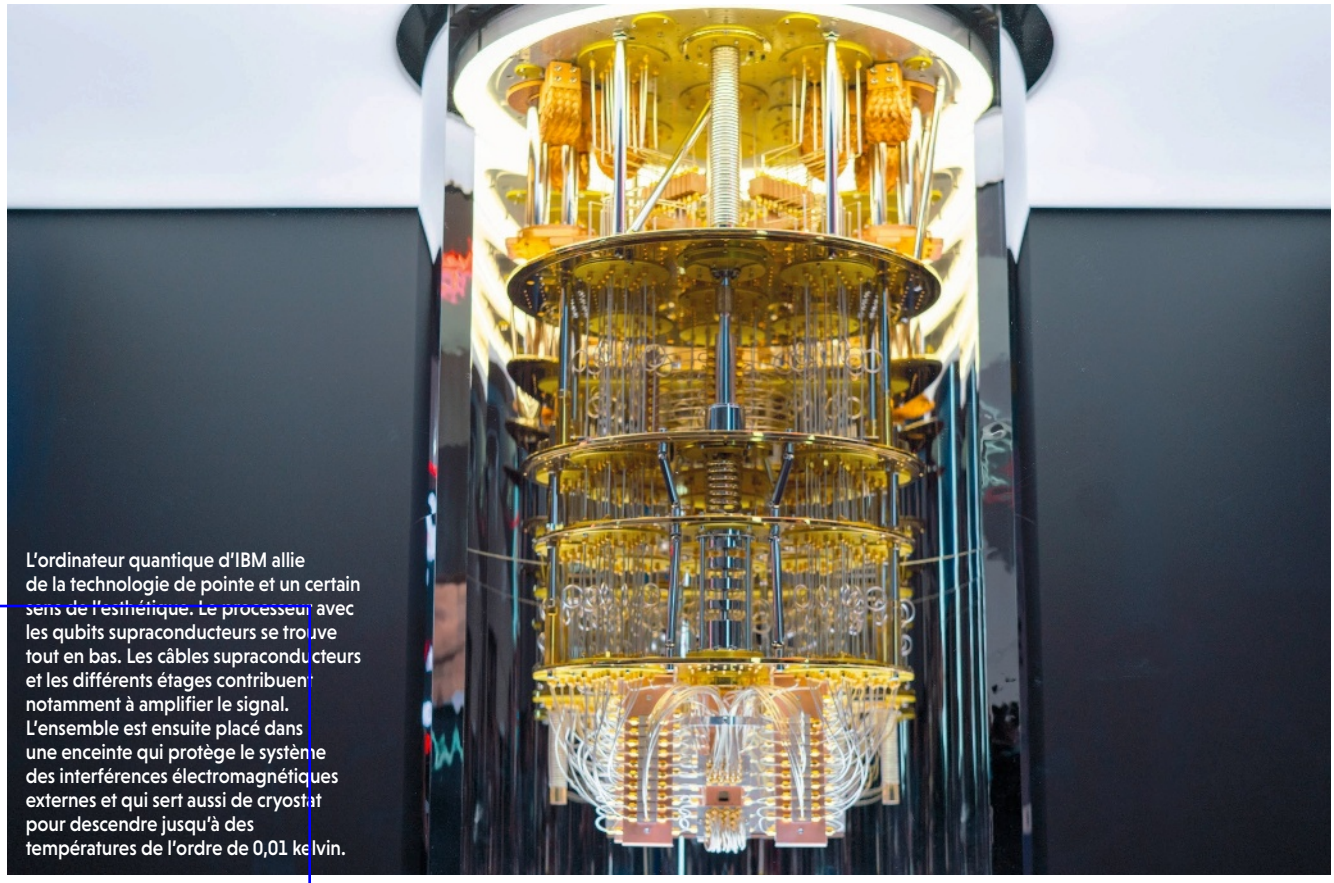
deux qubits logiques (A et B), de la même façon, vous menez l'opération entre les qubits physiques correspondants des qubits logiques A et B : le qubit 1 de A avec le qubit 1 de B, le qubit 2 de A avec le qubit 2 de B, etc. Comme cette porte limite les interactions entre les qubits physiques, les erreurs se propagent peu et restent sous contrôle.

Si toutes les portes nécessaires pour construire un jeu universel de portes étaient transverses, la vie serait simple. Mais, en 2008, Bryan Eastin et Emanuel Knill, de l'institut américain des standards et des technologies, ont montré dans un théorème fondamental qu'aucun code quantique ne peut effectuer un calcul universel en utilisant uniquement des portes transverses.

Cela nous dit quelque chose d'important sur les ordinateurs quantiques. Si vous entendez quelqu'un dire que la particularité de l'informatique quantique réside dans la superposition et l'intrication, méfiez-vous ! Tous les états de superposition et d'intrication ne sont pas spéciaux. Certains sont mis en œuvre par un groupe de portes transverses que nous appelons le « groupe de Clifford ». Un ordinateur classique peut simuler efficacement des calculs quantiques qui n'utilisent que des portes de Clifford (porte de Hadamard, porte d'inversion contrôlée ou porte de changement de phase, *voir l'encadré pages 34-35*). En revanche avec des portes qui n'appartiennent pas au groupe de Clifford, la simulation classique sera très difficile. Mais ces portes ont tendance à ne pas être transverses et donc à avoir une mauvaise fidélité (c'est-à-dire qu'elles ont une probabilité élevée d'introduire des erreurs).

COMMENT FAIRE SANS LES PORTES NON-CLIFFORD ?

La meilleure astuce dont nous disposons pour mettre en œuvre des portes non-Clifford protégées du bruit se nomme la distillation d'états magiques. Cette technique a été proposée en 2004 par Emanuel Knill puis par Andrei Kitaev et Sergey Bravyi. Vous pouvez implémenter des portes non-Clifford en utilisant uniquement des portes Clifford si vous avez accès à des états quantiques dits « magiques » (correspondant à une superposition particulière des états « 0 » et « 1 »). Ces états magiques doivent toutefois être très purs, c'est-à-dire comporter très peu d'erreurs. Andrei Kitaev et Sergey Bravyi ont montré que, dans certains cas, il est possible de partir d'une collection d'états magiques bruités et de les distiller, en employant exclusivement des portes de



L'ordinateur quantique d'IBM allie de la technologie de pointe et un certain sens de l'esthétique. Le processeur avec les qubits supraconducteurs se trouve tout en bas. Les câbles supraconducteurs et les différents étages contribuent notamment à amplifier le signal. L'ensemble est ensuite placé dans une enceinte qui protège le système des interférences électromagnétiques externes et qui sert aussi de cryostat pour descendre jusqu'à des températures de l'ordre de 0,01 kelvin.

© IBM

Clifford parfaites (on suppose ici que les portes de Clifford sont déjà protégées contre les erreurs). On aboutit à des états magiques moins nombreux, mais plus purs. En répétant plusieurs fois la procédure de distillation, on extrait un état magique pur à partir de nombreux états bruités.

Lorsque vous obtenez un état magique pur, vous pouvez le faire interagir avec le qubit contenant l'information. Pour cela, on utilise un processus de «téléportation quantique»: l'état du qubit d'information est transféré dans un autre état. Ce dernier correspond exactement à l'opération d'une porte non-Clifford. L'état magique est sacrifié dans le processus.

Aussi astucieuse que soit cette approche, elle est aussi extrêmement coûteuse. Pour un code de surface standard, la distillation des états magiques consomme 99% du calcul global. Il est clair que nous avons besoin de méthodes pour améliorer ou contourner cette distillation. En attendant, il est possible de continuer à travailler avec des ordinateurs quantiques bruités en utilisant la technique d'atténuation des erreurs. Au lieu d'essayer de concevoir un circuit quantique (*voir l'encadré pages 34-35*) pour corriger les erreurs de calcul en temps réel (ce qui nécessite des qubits supplémentaires), l'atténuation des erreurs fait appel à un ordinateur classique qui apprend à estimer la contribution du bruit et à l'annuler. Vous n'avez pas besoin de qubits supplémentaires, mais vous le payez en exécutant davantage de circuits quantiques (pour apprendre l'impact du bruit) et en introduisant plus de traitement classique.

ATTÉNUER LE BRUIT

Par exemple, si vous pouvez caractériser le bruit dans le processeur quantique ou l'analyser à partir d'un ensemble d'expériences sur des circuits bruités qui peuvent être simulés efficacement dans un ordinateur classique, vous pouvez utiliser ces connaissances pour faire une bonne estimation de la sortie du circuit quantique idéal (sans bruit). Ce circuit peut être considéré comme la somme de circuits bruités, chacun pondéré en fonction des informations des simulations. Ou alors, exécutez votre circuit quantique plusieurs fois en modifiant le bruit à chaque fois. À partir des différents résultats, vous pouvez ensuite extrapoler le signal attendu si le système fonctionnait sans erreur.

Ces techniques ont des limites. Elles ne s'appliquent pas à tous les algorithmes, et même lorsqu'elles s'appliquent, leur efficacité reste réduite. Mais une bonne stratégie consiste à combiner l'atténuation des erreurs et la correction des erreurs. Notre équipe théorique a récemment montré qu'en utilisant la correction d'erreur pour les portes de Clifford et l'atténuation d'erreur pour les portes non-Clifford, il est possible de simuler des circuits quantiques universels sans avoir besoin de distillation d'états magiques. De cette façon, il serait possible de surpasser les capacités d'ordinateurs classiques avec des ordinateurs quantiques plus petits. L'équipe a estimé que la combinaison particulière d'atténuation et

La distillation d'états magiques est la meilleure astuce à notre disposition

de correction des erreurs permet de simuler des circuits comportant jusqu'à 40 fois plus de portes non-Clifford que ce qu'un ordinateur classique peut gérer.

Pour continuer à progresser et imaginer des moyens plus efficaces de traiter les erreurs dans les ordinateurs quantiques, la stratégie idéale consiste en une boucle de rétroaction optimale entre les ingénieurs et les théoriciens. Grâce à ce dialogue constant, les théoriciens adaptent les circuits quantiques et les codes correcteurs d'erreurs aux contraintes techniques des machines tandis que les ingénieurs conçoivent des systèmes qui répondent aux spécificités des codes correcteurs d'erreurs. Le succès des ordinateurs quantiques dépend de la capacité à trouver des compromis entre ces deux approches.

Je suis fière d'avoir contribué à faire passer l'informatique quantique du monde des démonstrateurs de laboratoire à un ou deux qubits au stade où certaines sociétés ouvrent la possibilité à des utilisateurs d'accéder à des systèmes quantiques comportant des dizaines de qubits *via* le *cloud*. Mais la partie est loin d'être gagnée. Pour tirer parti des possibilités tant vantées de l'informatique quantique, il faudra développer des systèmes qui fonctionnent en dessous du seuil d'erreur, des codes quantiques capables de corriger les erreurs restantes avec le moins de qubits et de portes supplémentaires possible, et de meilleurs moyens de combiner la correction et l'atténuation des erreurs. Nous écrivons progressivement l'histoire des ordinateurs de demain, mais la route reste longue et semée d'embûches. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. R. Monroe *et al.*, **L'ordinateur quantique en kit,** *Dossier Pour la Science*, n° 93, octobre 2016.

S. Aaronson, **Les limites du calcul quantique,** *Pour la Science*, n° 367, mai 2008.

S. B. Bravyi et A. Y. Kitaev, **Universal quantum computation with ideal Clifford gates and noisy ancillas,** *Physical Review A*, 2005.

S. B. Bravyi et A. Y. Kitaev, **Quantum codes on a lattice with boundary,** arXiv:quant-ph/981 1052, 1998.

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

☐ N° 535 (mai 22)
—×9,50 €
= ____,____ €

☐ N° 534 (avril 22)
—×9,50 €
= ____,____ €

☐ N° 533 (mars 22)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 532 (fév. 22)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 531 (janv. 22)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 530 (déc. 21)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 529 (nov. 21)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 528 (oct. 21)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 527 (sept. 21)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 526 (août 21)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 525 (juil.21)
—×9,40 €
= ____,____ €

☐ N° 524 (juin 21)
—×9,40 €
= ____,____ €

PAG22VPC

☑ OUI, je commande des numéros de **Pour la Science**

1 / JE COCHE LES RÉFÉRENCES ET JE RENSEIGNE LES QUANTITÉS CI-DESSUS ET JE REPORTE LE TOTAL CI-DESSOUS

Total à régler : ____,____ €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal : _____ Ville : .....

Téléphone : _____

Courriel : .....

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

3 / JE RETOURNE LE COUPON ET MON RÈGLEMENT

J'émets un chèque **à l'ordre de *Pour la Science*** du montant total de la commande. J'adresse le bulletin et mon chèque par courrier postal à l'adresse suivante :

Service abonnement – Groupe Pour la Science
235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne-Billancourt

COMMANDEZ PLUS SIMPLEMENT !

En vous rendant sur notre site internet vous pourrez :

- Retrouver toute notre collection
- Vérifier la disponibilité des anciens numéros
- Acheter les numéros en version numérique (4,49 €)
- Effectuer un paiement en ligne

Pour cela, scannez le QR code ci-contre ou rendez-vous sur **boutique.groupepourlascience.fr**

Une question ? Contactez notre service clients à l'adresse : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante :https://rebrand.ly/CGV-PLS. Offre valable jusqu'au 21/12/2022 en France Métropolitaine uniquement. 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.

L'incendie est l'une des sources d'accident redoutées dans les installations nucléaires.

L'IRSN et les feux électriques

Des recherches de grande intensité !

Cahier partenaire réalisé avec
IRSN
www.irsn.fr

CONTEXTE

De l'ordre de 200 départs de feu caractérisés par des flammes ou seulement un dégagement de fumée se sont produits dans les centrales nucléaires françaises entre 2018 et 2020. À l'origine d'environ la moitié d'entre eux, un court-circuit, une surchauffe de câble ou un arc électrique. Une part significative de ces départs de feu s'est produite dans des armoires et tableaux électriques. Les rares qui se sont développés ont pu être maîtrisés.

L'IRSN mène des essais sur sa plateforme de recherche expérimentale à Cadarache (région Paca) pour caractériser avec précision les feux électriques et leur propagation dans des configurations représentatives des locaux d'installations nucléaires. Objectif : évaluer les conséquences de ce type d'incendie et valider des outils de simulation pour améliorer les analyses de sûreté des installations nucléaires.

Cadarache, 28 juin 2019, 9 heures, en salle de commande de l'installation Diva. Pascal Zavaleta, ingénieur-chercheur au laboratoire d'expérimentation des feux de l'IRSN donne les dernières consignes aux sept membres de son équipe, tous en tenue anti-feu. Depuis trois mois déjà, ils ont reçu les armoires électriques câblées selon leur cahier des charges. Elles sont en place, tout comme les chemins de câbles qui les surmontent et les équipements de mesure destinés au suivi de l'essai. La veille, une fois encore, ils ont vérifié l'instrumentation, les réglages de la ventilation, l'étanchéité des locaux et testé la rampe à gaz qui servira de système de mise à feu de l'armoire. Plus de 600 capteurs ont été étalonnés un à un : des thermocouples pour mesurer la température, des fluxmètres pour les flux de chaleur, des sondes de vitesse pour les écoulements, des analyseurs pour les concentrations de gaz et de suies, des capteurs de pression, des caméras vidéo…

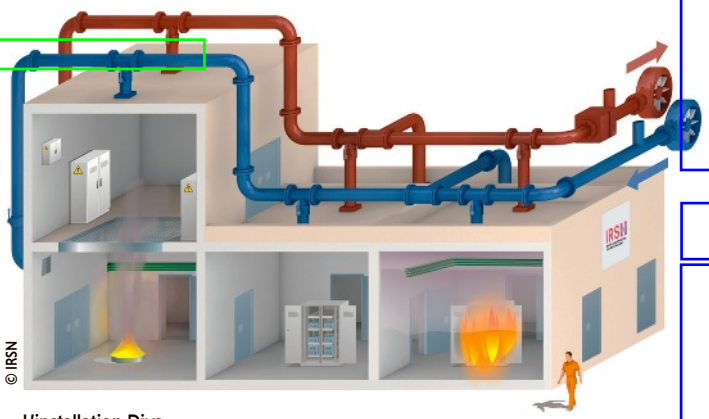
10 heures. Tout est prêt. L'équipe pilote à distance la ventilation puis déclenche la mise à feu dans l'armoire électrique. Les yeux rivés sur les écrans, elle suit attentivement les premières augmentations de température ou de pression, prête à lancer un prélèvement de suie. Dans l'armoire, les premiers composants s'embrasent. Le feu se développe verticalement. Les câbles situés au-dessus de l'armoire s'enflamment à leur tour et l'incendie se propage, lentement.

Deux à trois heures plus tard, tout a quasiment brûlé dans l'armoire, et le feu sur les chemins de câbles s'est éteint. Le lendemain matin, l'équipe pénètre dans les locaux, observe tout minutieusement, prend des photos. Puis armoires et câbles sont évacués et remplacés pour l'essai suivant, alors que le dispositif instrumental, lui, reste en place. Quatre expérimentations sont prévues lors de cette campagne, l'ensemble des données recueillies nécessitera trois à quatre mois d'analyse par Pascal Zavaleta. >

© Adobe Stock - CMOM

> Tous ces essais ont lieu sur la plateforme Galaxie, dédiée à l'étude du risque incendie. On y étudie des foyers en milieu ouvert pour évaluer la puissance maximale du feu mais aussi l'impact de locaux confinés et ventilés, typiques de ceux des installations nucléaires. « *De quoi caractériser un large éventail de conditions,* ajoute Pascal Zavaleta. *Grâce à ces moyens uniques en leur genre, nous pilotons plusieurs programmes de recherche internationaux comportant de nombreux essais en matière d'incendies, notamment en collaboration avec des entreprises du secteur nucléaire.* » Depuis 2000, l'IRSN a mené une cinquantaine d'essais pour reproduire des feux d'origine électrique, et encore d'avantage pour étudier des feux d'hydrocarbures ou d'autres matériaux combustibles.

LA DIVA DES FEUX



© IRSN

L'installation Diva.

Dans la plateforme d'essais Galaxie, Diva est l'installation réservée à la caractérisation de la propagation des feux et de leurs conséquences dans des locaux industriels confinés et ventilés mécaniquement. Elle possède quatre pièces et un couloir de 15 mètres de long qui permet d'étudier la propagation du feu sur de longues distances. Diva comporte environ 800 capteurs répartis dans un volume total de 650 m^3. Ses murs en béton armé supportent les surpressions liées à l'incendie et à d'éventuelles inflammations brutales de mélanges de gaz imbrûlés et d'air (voir l'encadré ci-contre).

Pourquoi de tels moyens expérimentaux ? Parce que les installations nucléaires, comme la plupart des sites industriels, possèdent de nombreux équipements électriques comme des armoires de contrôle-commande pour piloter, *via* des centaines de kilomètres de câbles, le fonctionnement de pompes, de ventilateurs, de moteurs, etc. Et nul n'est à l'abri d'un court-circuit en cas de défaut d'isolation, d'échauffement d'un conducteur électrique à cause d'une mauvaise connexion ou d'amorçage d'un arc électrique. Parfois, il se produit un départ de feu caractérisé seulement par un dégagement de fumée, ou aussi par des flammes ; et celles-ci risquent de se propager car il y a beaucoup de combustible dans les gaines de câbles et les composants en plastique présents dans les armoires et tableaux électriques.

D'IMPORTANTS TRAVAUX DE RECHERCHE

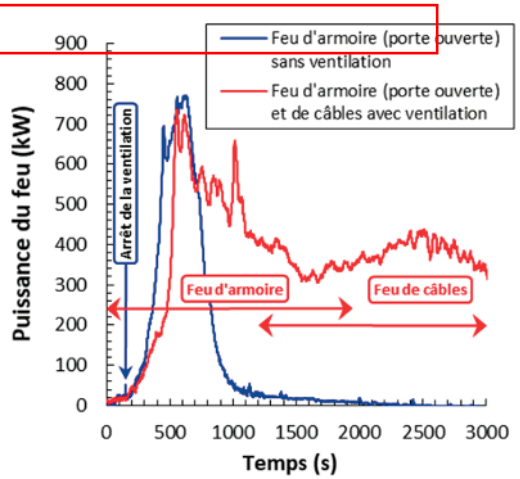
Les locaux des installations nucléaires présentant un risque significatif de départ de feu font l'objet de dispositions particulières notamment en matière d'intervention (détecteurs d'incendie et systèmes d'extinction) et de limitation de la propagation (sectorisation des locaux, protections coupe-feu). Ainsi, peu d'incendies s'y déclenchent et se propagent. Leurs impacts sur la sûreté des installations nucléaires sont néanmoins redoutés. C'est pourquoi d'importants travaux de recherche sont réalisés pour mieux comprendre le développement de tels incendies et leurs conséquences. L'accident qui fait date en la matière est celui de Browns Ferry, aux États-Unis, en 1975, où plus de 1 600 câbles électriques avaient été endommagés du fait d'une erreur humaine lors de travaux de maintenance. Le feu s'était propagé par ces câbles jusqu'au bâtiment du réacteur, provoquant la perte du contrôle de certains équipements importants pour la sûreté.

Des incendies ont eu lieu dans le parc nucléaire français, avec des conséquences plus ou moins significatives. En voici quelques exemples : en 1999, à la centrale du Bugey, dans l'Ain, un incendie s'est déclaré à cause d'un défaut électrique dans un tableau de la station de pompage ; en 2012, à la centrale de Penly en Seine-Maritime, c'est une fuite d'huile dans un groupe motopompe primaire qui était en cause ; en 2021 à la centrale de Paluel (Seine-Maritime), un transformateur s'est enflammé en raison d'un défaut électrique. Parmi ces trois incendies significatifs, tous maîtrisés, deux sont d'origine électrique.

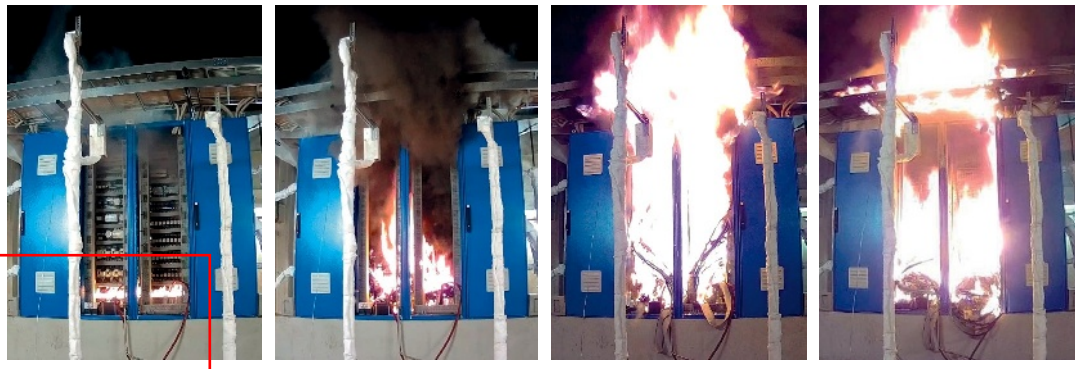
RETARDER L'INFLAMMATION DES CÂBLES ÉLECTRIQUES

Du fait de l'accident de Browns Ferry, les fabricants de câbles et les industriels, notamment du secteur nucléaire, ont réalisé d'importants efforts pour réduire les risques d'incendies liés aux câbles électriques. Ils ont développé des câbles avec des gaines incorporant des retardateurs de flamme, par exemple à base d'hydroxyde d'aluminium. « *La décomposition thermique de ce matériau retarde l'inflammation pour plusieurs raisons,* détaille Pascal Zavaleta *: étant endothermique, elle refroidit les matériaux combustibles des gaines des câbles ; elle produit également de la vapeur d'eau, ce qui dilue les gaz de pyrolyse (voir encadré). De plus, l'oxyde d'aluminium résultant de cette décomposition, forme une croûte protectrice sur la surface de la gaine, ce qui limite sa combustion.* »

IMPACT DU PILOTAGE DE LA VENTILATION DES LOCAUX SUR LA PUISSANCE DU FEU



Si l'arrêt de la ventilation (courbe bleue), 2 min 30 s après le début du feu, n'a pas permis d'éviter l'embrasement total de l'armoire porte ouverte (l'oxygène étant alors disponible en quantité), il a réduit la durée de sa combustion et empêché la propagation du feu vers les chemins de câbles situés au-dessus, contrairement à ce qui s'est produit lors de l'essai pour lequel la ventilation a été maintenue (courbe rouge).



© IRSN

Essai de feu d'armoire électrique

Plus tard, dans les années 2000, les armoires électriques ont été identifiées comme cause importante des départs de feu. L'IRSN a alors focalisé ses recherches en matière d'incendie sur le sujet, en collaboration avec Orano (ex-Areva). *« Nous avons notamment étudié l'effet du confinement et de la ventilation sur le développement du feu et la durée de l'incendie, ainsi que l'impact de l'ouverture des portes des armoires électriques,* explique Pascal Zavaleta. *C'est loin d'être anecdotique : la puissance du feu est plus de vingt fois supérieure portes ouvertes que fermées. »*

MESURER PUISSANCE ET IMPACT

Premier objectif des essais incendie : calculer la puissance du feu, paramètre capital pour décrire le scénario de l'incendie et évaluer ses conséquences. *« Pour cela, nous avons développé des méthodes inédites adaptées à un environnement confiné et ventilé,* précise-t-il. *Elles s'appuient en particulier sur les nombreuses mesures de température, de flux de chaleur, de concentrations des gaz de combustion et d'oxygène, de débit des gaz dans les gaines de ventilation. »*

Ensuite, après 2010, dans le cadre des programmes de recherche internationaux baptisés Prisme, conduits par l'IRSN avec des partenaires français, dont EDF, et une dizaine de partenaires étrangers, des essais ont permis de poursuivre l'étude de l'impact de la ventilation sur la puissance du feu (voir figure ci-contre) et d'évaluer le risque de propagation du feu d'une armoire vers des chemins de câbles et vers d'autres armoires électriques.

Conclusions : *« Concernant les chemins de câbles placés au-dessus des armoires électriques, les essais ont montré que les câbles sans retardateur de flamme se sont embrasés moins de cinq minutes après que l'armoire a totalement pris feu, alors que les câbles avec retardateur de flamme ont résisté pendant plus de dix minutes, un temps précieux pour les services d'intervention »*, explique le chercheur. Pendant un tel essai, dans le local, les températures fluctuent entre 50 °C à 100 °C au sol et 400 °C voire 500 °C au plafond.

Concernant les armoires, lorsque celle (porte ouverte) qui est en feu est entourée de deux autres, sans lame d'air entre elles, les essais ont révélé que le feu se propage dans les armoires adjacentes par des composants internes en plastique qui s'enflamment en raison du rayonnement thermique des parois. Récemment, des essais sur des maquettes d'armoire à échelle ¼ ont montré que le feu peut également se propager lorsqu'elles sont espacées de quelques centimètres, pour les mêmes raisons.

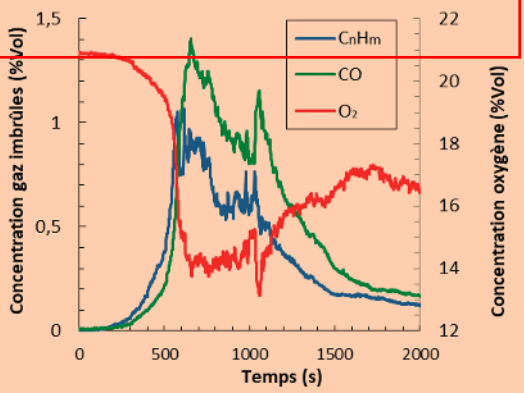
L'ensemble de ces données permet de valider les logiciels Sylvia et Calif3S-Isis que développe l'IRSN. Le premier, basé sur une approche à deux zones, simule globalement l'incendie dans une installation couplée à un réseau de ventilation modélisé par des conduites, filtres, ventilateurs… Le second reproduit en détail le développement d'un incendie dans des locaux confinés et ventilés grâce à une approche CFD (computational fluid dynamics) tri-dimensionnelle, qui simule des écoulements faiblement compressibles, turbulents et réactifs.

« Nos résultats alimentent nos analyses de sûreté incendie ainsi que celles de nos partenaires nationaux et internationaux, conclut Pascal Zavaleta. *Ils permettent également de sensibiliser un large spectre d'acteurs industriels concernés par le risque incendie, des bureaux d'études des grands exploitants du nucléaire aux fabricants d'armoires électriques. »*

QUELS GAZ DE COMBUSTION EN MILIEU CONFINÉ ?

La pyrolyse, décomposition chimique d'un matériau organique sous l'effet de la chaleur, produit des gaz combustibles, ou « gaz de pyrolyse », comme le méthane ou l'éthylène. En présence d'une source de chaleur, leur mélange avec l'oxygène de l'air (O_2) risque de s'enflammer si leurs concentrations sont suffisantes. Lorsque l'oxygène ne manque pas, la combustion est complète et produit de la vapeur d'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2).

En cas de déficit d'oxygène, la combustion est incomplète, comme le montre la figure ci-dessous, dans le cas d'un essai de combustion d'une armoire électrique dans un local confiné : en plus du CO_2 et de l'H_2O, de nombreux autres produits se forment, dont le monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures gazeux imbrûlés (C_nH_m) et des particules solides de carbone, appelées « suies ». Le CO et les C_nH_m constituent une part importante de gaz imbrûlés, qui peuvent s'accumuler dans certaines zones des locaux, par exemple sous le plafond. En cas de nouvel apport d'oxygène lors de la reprise de la ventilation ou lors de l'ouverture d'une porte à la suite d'une intervention humaine dans le local, un mélange inflammable est susceptible de se former et de s'embraser violemment au contact d'une petite flamme ou étincelle (ou spontanément si la température des gaz est suffisamment importante). C'est le phénomène de *backdraft*.



Quand le feu se développe dans l'armoire, le local s'appauvrit en O_2 (courbe rouge). En conséquence, les concentrations en C_nH_m et CO augmentent (respectivement courbes bleue et verte). Ensuite, la concentration en O_2 est quasi stable quand l'armoire brûle, sa consommation par le feu d'armoire étant compensée par l'apport de la ventilation du local, puis elle augmente à nouveau avec le déclin de la combustion de l'armoire et le maintien de la ventilation du local, celles des gaz imbrûlés diminuant parallèlement.

RÉFÉRENCES

> Coutin, M., Plumecocq, W., Zavaleta, P., Audouin, L., 2015, Characterization of open-doors electrical cabinet fires in compartments, *Nuclear Engineering and Design*, 286, p104-115. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.01.017

> Zavaleta, P., Suard, S., Audouin, L., Fire spread from an open-doors electrical cabinet to neighboring targets in a confined and mechanically ventilated facility, *Fire and Materials*, 2019, 43:466-485. https://doi.org/10.1002/fam.2685

> Zavaleta, P., Bouygues, O., Lapuerta, C., Electrical component ignition in a closed enclosure adjacent to a controlled fire, *Fire and Materials*, 2021, 45:331-344. https://doi.org/10.1002/fam.2792

> Zavaleta, P., Experimental study at reduced-scale of fire spread between electrical cabinets located opposite each other, *Fire Safety Journal*, 2021 (122). https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103319

ÉTIENNE DECROLY
est virologue, directeur de recherche CNRS au laboratoire AFMB (Architecture et fonction des macromolécules biologiques) de l'université Aix-Marseille.

ORIGINE DU COVID-19

Sans informations précises sur ce qui se passait dans le laboratoire de Wuhan on n'avancera pas !

Depuis fin 2019, le monde est confronté au Covid-19, l'une des plus importantes pandémies qu'il ait connues. On la doit à un coronavirus, le SARS-CoV-2, dont on peine à connaître l'origine malgré les efforts déployés. Plusieurs hypothèses sont en lice, et toutes sont, à ce jour, plausibles.

Après plus de deux ans de Covid-19, peut-on revenir sur les premiers temps de l'épidémie ?

Le premier épicentre de propagation du virus connu se situe dans la ville de Wuhan. Ce foyer épidémique important a engendré la dispersion du virus à travers le monde et déclenché la pandémie actuelle. Les experts de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) suggèrent que l'origine de l'épidémie se situerait plus précisément sur le « marché humide » de cette ville, sans doute à la suite de la contamination par un animal qui n'a pas encore été identifié. Le virus se serait alors rapidement adapté pour que la transmission interhumaine soit possible avec efficacité.

Nous sommes en décembre 2019…

La question est sujette à discussion dans la littérature, non pas celle du début de la première flambée épidémique, qui est bien en décembre 2019-janvier 2020, mais celle de savoir à quelle date remontent véritablement les premiers cas d'infection humaine qui ont pu passer sous les radars. On sait aujourd'hui que la majorité des personnes infectées font des formes asymptomatiques. La recherche des premiers patients est donc compliquée, car beaucoup d'entre eux n'ont pas eu à se rendre dans un hôpital.

Comment, dès lors, estimer le « vrai » début ?

Différentes méthodes existent. La première est celle « des horloges biologiques » dont le postulat est que les mutations apparaissent à un rythme régulier mesurable. En fonction de la diversité des premiers génomes identifiés, il est possible d'estimer le début de l'épidémie humaine entre septembre et novembre 2019.

L'autre méthode couramment utilisée est fondée sur la recherche du patient « zéro ». Elle consiste à traquer les traces d'une infection ancestrale qui n'aurait pas pu être associée au SARS-CoV-2 à l'époque de la collecte. Ce travail d'enquête épidémiologique est incomplet dans le rapport de la commission conjointe OMS-Chine, mais l'organisation internationale annonce vouloir poursuivre la recherche du patient zéro. Ces informations seraient particulièrement éclairantes sur l'origine de l'épidémie et conduiraient à des séquences génétiques plus ancestrales du virus, juste après le franchissement de la barrière d'espèce.

Que se passe-t-il entre les premiers cas et l'« explosion » épidémique ?

L'émergence du MERS-CoV en Arabie saoudite en 2012 apporte des informations clés. Initialement, le virus circule chez les chauves-souris, puis il infecte un hôte intermédiaire (le dromadaire) auquel il s'adapte progressivement. Le virus peut alors contaminer les éleveurs ou des personnes en contact avec les animaux infectés. Au départ, le virus n'est pas adapté au nouvel hôte humain, ce qui se traduit par des infections sporadiques avec peu de cas secondaires. Par la suite, les virus compétents pour la transmission interhumaine sont sélectionnés et déclenchent le début de l'épidémie. Les experts considèrent donc que l'émergence de nouvelles épidémies doit être précédée d'infections sporadiques par des virus ayant un potentiel de transmission interhumaine limité.

Parmi les tout premiers virus qui circulaient en décembre 2019, deux souches différentes coexistaient, la « A » et la « B », qui se distinguent par seulement deux mutations, ce qui a conduit certains scientifiques à proposer qu'il y ait eu deux événements indépendants de franchissement de la barrière d'espèce sur le marché humide, confortant ainsi l'hypothèse de l'origine zoonotique du virus. Toutefois, chez un patient contaminé, il est usuel de retrouver des virus contenant quelques mutations [l'une des deux souches pourrait donc découler de l'autre, ndlr]. Il est également étonnant que les souches A et B aient été déjà adaptées pour une transmission

EN CHIFFRES

510 441 943
cas confirmés dans le monde (au 26/04/2022)

6 221 480
décès dans le monde (au 26/04/2022)

27 567 552
cas confirmés en France (au 26/04/2022)

142 074
décès en France (au 26/04/2022)

© watchara/Shutterstock

interhumaine efficace. Comme ni le virus progéniteur de l'épidémie ni l'espèce animale – vendue sur le marché – à l'origine de ces premières contaminations n'ont été identifiés à ce jour, d'autres hypothèses doivent être considérées pour expliquer ces observations. Le début de l'épidémie est possiblement plus précoce qu'on ne l'imaginait, et l'épisode du marché de Wuhan en décembre 2019 correspondrait alors à un épisode d'amplification de l'épidémie. Cette hypothèse est étayée par l'identification récente de nouvelles séquences ancestrales de SARS-CoV-2 à partir de données de séquençages issues de banques de données publiques. La question de l'origine reste donc entière.

La quête du patient zéro, après plus de deux ans et demi, reste-t-elle possible ?

Oui, bien sûr. Cependant, plus le temps passe, plus elle sera difficile. L'OMS doit pouvoir enquêter et l'accès aux échantillons par les scientifiques est indispensable pour effectuer ce travail dans le contexte de la controverse sur l'origine du virus. Si l'épicentre de l'épidémie semble localisé, le débat reste entier sur son rôle. Est-il le foyer des premières infections et de la transmission zoonotique à partir d'un animal qui aurait été vendu sur ce marché ? Ou bien a-t-il été un événement amplificateur ?

Dans les deux cas, on reste dans le schéma d'une zoonose « classique » ?

Les deux scénarios sont compatibles avec l'hypothèse de la zoonose déclenchée au marché de Wuhan en décembre 2019 ou probablement plus précocement. Il est également possible que les contaminations proviennent de patients contaminés ailleurs, dans le Yunnan, typiquement, qui ont ensuite rejoint la ville de Wuhan. Une autre hypothèse est celle d'une fuite accidentelle d'un laboratoire de recherche dans la mesure où la ville de Wuhan est connue pour en héberger plusieurs travaillant sur les coronavirus : collecter des échantillons dans la faune sauvage, rapporter en laboratoire des virus ou des animaux infectés, cultiver ces virus dans les laboratoires… toutes ces activités présentent des risques si elles ne sont pas réalisées dans des conditions de sécurité appropriées.

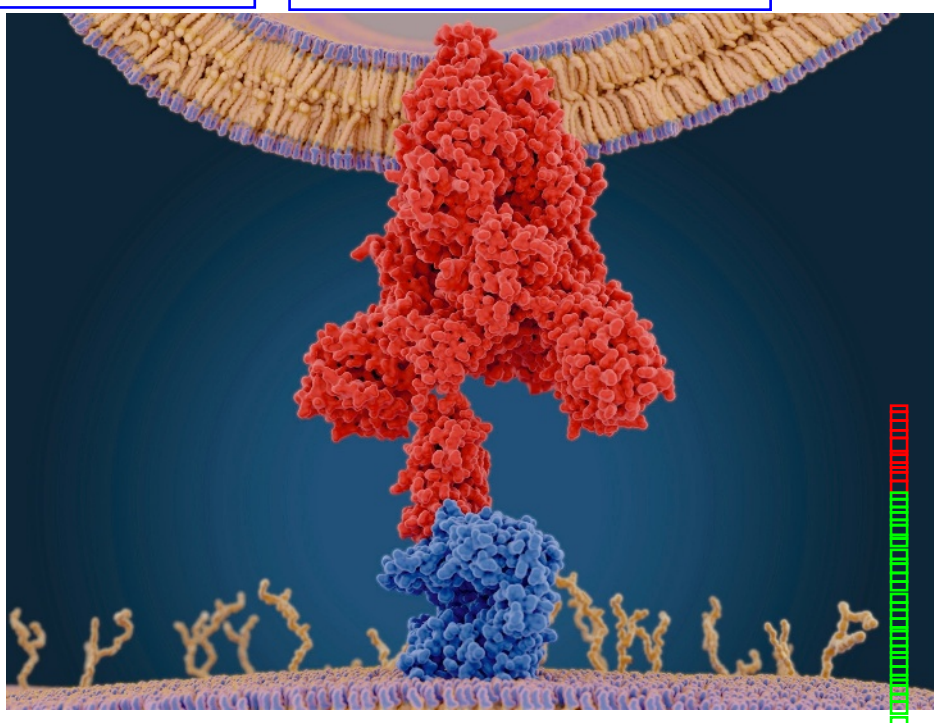
Détaillons chacun des scénarios. Dans celui de la zoonose au marché de Wuhan, qu'en est-il de l'éventuel hôte intermédiaire ?

Pour reconstituer la chaîne de transmission, une solution est de chercher les plus proches cousins du SARS-CoV-2, ou le progéniteur de l'épidémie. Ce travail doit être poursuivi chez les chauves-souris et chez des espèces animales élevées susceptibles d'être infectées. La commission conjointe OMS-Chine a analysé plus de 80 000 échantillons provenant d'élevages intensifs, d'animaux sauvages… sans succès. Seul un proche cousin du SARS-CoV-2 a été identifié, le RaTG13. Ce virus a été collecté en 2013 dans une mine du Yunnan, mais sa séquence complète n'a pas été rendue publique avant février 2020. Des cousins plus proches encore ont été découverts plus récemment en février 2022 par l'équipe de Marc Eloit, de l'institut Pasteur, au nord du Laos.

Ces virus ont un génome homologue à environ 96-97 % avec celui du SARS-CoV-2, ce qui correspond à un bon millier de mutations, soit une divergence évolutive de vingt à quarante ans. Certains virus isolés au nord du Laos reconnaissent le récepteur ACE2 humain, la porte d'entrée dans nos cellules, à l'inverse de la plupart des virus de chauve-souris. Toutefois, il leur manque le facteur clé d'une bonne transmission interhumaine, le site de clivage de la furine.

De quoi s'agit-il ?

Au moment où les virus sont produits par une cellule infectée, les protéines Spike qui reconnaissent le récepteur ACE2 sont dans une conformation à très faible affinité pour ce récepteur cellulaire. L'action de la furine, une protéase humaine présente à la surface cellulaire, coupe Spike en deux sous-unités et entraîne un changement de conformation qui favorise la reconnaissance du récepteur ACE2. Cet événement expose un second site de clivage qui déclenche l'infection des cellules. Les protéases naturellement exprimées chez les chauves-souris et les humains n'étant pas identiques, les séquences des sites de clivage sont un élément de la barrière d'espèce. Aujourd'hui, le consensus est que la présence de ce site de



Le coronavirus SARS-CoV-2 *(en haut)* se lie au récepteur ACE2 *(en bleu)* grâce à la protéine Spike *(en rouge)*.

clivage par la furine a joué un rôle déterminant dans la transmission interhumaine du SARS-CoV-2. Au-delà de ces données factuelles, la question de l'origine de ce site furine reste controversée.

Sur quelles questions porte le débat ?

D'abord, précisons que ce site de clivage par la furine est présent sur les protéines d'enveloppe de nombreux virus comme le VIH, Ebola, le MERS-CoV. Il est considéré par les virologues comme un facteur de virulence potentiellement important pour les infections grippales favorisant le potentiel zoonotique. Avec les outils actuels de la biologie moléculaire, il est possible d'insérer un site de clivage dans un virus préexistant. La question de l'origine naturelle ou artificielle du site de clivage par la furine dans le SARS-CoV-2 est clé.

Quels sont les arguments en faveur des deux hypothèses ?

Concernant l'origine naturelle de cette insertion, les analyses génétiques des protéines Spike ont révélé l'insertion sporadique de séquences nucléotidiques. Ces insertions pourraient résulter d'un processus dit de *template switching*. En effet, lors de la co-infection d'une cellule par deux coronavirus, la polymérase serait capable de sauter d'un ARN viral à un autre, favorisant ainsi la formation de virus chimériques, ou d'insérer de courtes séquences génétiques venues d'ailleurs. Les défenseurs de l'origine naturelle du site de clivage à la furine postulent que l'insertion de ce site résulte de ce type de processus. Toutefois, l'origine de la séquence nucléotidique insérée dans la protéine Spike du SARS-CoV-2 reste énigmatique.

Pour progresser, de nombreuses équipes traquent dans les séquences nucléotidiques des multiples coronavirus trouvés chez les chauves-souris, celles de sites furine ressemblant à ceux du coronavirus du Covid-19 afin d'étayer l'hypothèse de l'origine naturelle du virus.

À l'opposé, les partisans de l'origine non naturelle se demandent si l'insertion du site furine ne résulte pas de manipulations génétiques. Une des difficultés de cette hypothèse est aujourd'hui que les séquences de virus potentiellement utilisés à Wuhan pour ces manipulations ne sont pas disponibles dans les banques de données. Le malaise est qu'il existe pourtant une banque de données de coronavirus ayant été manipulés dans les laboratoires de Wuhan, mais elle n'est plus consultable depuis septembre 2019.

Ce qui nous ramène à l'hypothèse de l'accident de recherche…

Elle a été considérée comme très improbable par le rapport de la commission conjointe OMS-Chine, sans pour autant qu'il y ait eu

Des virus très proches du SARS-CoV-2 ont été découverts en 2022 au nord du Laos

d'enquête dans les différents laboratoires de virologie de Wuhan. Le directeur général de l'OMS a pris le contre-pied des conclusions du rapport et a affirmé que toutes les hypothèses restent sur la table et que de nouvelles investigations sont nécessaires. Cette position est à saluer, car l'enjeu est de comprendre les mécanismes qui sous-tendent l'émergence de cette épidémie et, *in fine*, de mettre en place des contre-mesures.

L'hypothèse d'un d'accident de recherche recouvre tout un continuum de scénarios, de la contamination d'un expérimentateur par un virus « naturel », par exemple au moment de la collecte d'échantillons, jusqu'à celle d'un virus modifié évoqué précédemment. Parmi ces scénarios, une possibilité est que des coronavirus de chauve-souris aient acquis des mutations les rendant infectieux pour des cellules humaines lors de leur culture dans des lignées cellulaires humaines ou de l'infection de souris modifiées de manière à exprimer le récepteur ACE2 humain.

La question est celle d'éventuels travaux de gain de fonction à Wuhan. De quoi s'agit-il et à quoi servent-ils ?

Comprendre les mécanismes de franchissement de la barrière d'espèce est un enjeu capital pour essayer de prévenir l'émergence de nouveaux virus. En effet, l'idée est que s'il est possible de détecter les virus à potentiel pandémique juste avant le franchissement de la barrière d'espèce, il serait possible de contrôler les zoonoses. L'objectif est de comprendre au niveau moléculaire les mécanismes d'adaptation de ces virus pour l'infection des cellules humaines. Plusieurs méthodes existent, comme identifier des mutations associées au franchissement de la barrière d'espèce ou à la virulence. Dans le contexte de la grippe, des mutations d'adaptation du virus aux infections humaines ont été repérées et sont désormais surveillées par les épidémiologistes. En 2012, des chercheurs américains et hollandais ont introduit ces mutations de virulence dans des virus aviaires et ont démontré qu'elles

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

© Juan Gaertner/Science Photo Library/Gettyimages

augmentaient l'efficacité de la transmission du virus par aérosol. C'est un gain de fonction.

Ce type d'expériences a divisé la communauté scientifique. Certains y voient une démonstration de l'importance de ces mutations de virulence. D'autres considéraient que l'importance de ces mutations avait déjà été démontée et que le risque pandémique est non négligeable en cas d'accident.

Ce débat a eu deux conséquences : un embargo sur la publication de ces travaux et le décret d'un moratoire, aux États-Unis, sur le financement des expériences de gain de fonction à partir de 2014, suspendu et remplacé en 2017 par un protocole spécifique d'évaluation du financement de ce type d'expériences sur les virus a potentiel pandémique.

Qu'en est-il dans le cas des coronavirus ?

La culture de virus de chauves-souris est techniquement difficile, alors que le séquençage de ces virus est possible. Pour donner un ordre d'idée, on estime qu'à l'Institut de virologie de Wuhan, les équipes disposaient de moins d'une dizaine de coronavirus isolés et cultivables, alors qu'ils en ont séquencé des centaines, voire des milliers.

Pour contourner cette difficulté d'isolement de virus infectieux, les scientifiques ont mené conjointement dès 2015 des expériences de construction de virus chimériques. L'idée est simple : copier-coller et assembler différentes parties d'un coronavirus, en partant d'un virus aisément cultivable au laboratoire (on parle de « squelette »), puis tester le pouvoir infectieux des virus chimériques. Ces expériences ont permis d'évaluer leurs capacités à infecter différents types cellulaires et leur pathogenèse a été démontrée dans des modèles animaux. Toutefois, ces expériences comportent des risques, car on construit des virus potentiellement capables d'infecter des cellules de chauves-souris, d'humains ou d'autres espèces. En 2017, huit nouveaux virus chimériques ont été construits dans un squelette de coronavirus de type SRAS. Ce travail a mis en évidence que certains virus de chauve-souris ont un potentiel de franchissement de la barrière d'espèce, car ils reconnaissent la protéine ACE2 humaine. Bien que ces expériences aient été réalisées dans un virus squelette qui ne correspond pas au SARS-CoV-2, les risques liés à ces constructions de virus chimériques sont importants. De plus, l'Institut de virologie de Wuhan en collaboration avec l'ONG américaine EcoHealth Alliance projetait d'insérer des sites furine dans des coronavirus afin d'étudier leur effet sur le pouvoir infectieux des virus. Ce projet soumis à la Darpa (Defense Advanced Research Projects Agency, agence du département de la Défense des États-Unis) n'a heureusement pas été financé. La question en suspens est de savoir si

© Future Publishing / Contributeur/GettyImages

une partie de ces expériences ont toutefois été menées, malgré les risques encourus.

Est-il possible d'identifier les traces de ces expériences de gain de fonction ?

Les premières méthodes développées laissaient des traces, car les virus étaient assemblés à partir de fragments portant des sites de coupure identifiables. Ce n'est plus le cas aujourd'hui : il est donc impossible de trancher sur la base des séquences du SARS-CoV-2. Pour sortir de ce débat, où chacune des hypothèses est étayée plus ou moins solidement, on manque de faits scientifiques probants. La seule solution est d'avoir de nouvelles séquences, et de conduire une enquête dans le laboratoire de Wuhan.

Concernant les données de séquençage, certaines n'ont pas été rendues accessibles ni à l'OMS ni à la communauté scientifique, notamment celles d'une base de données dont nous avons parlé et contenant les séquences de nombreux virus collectés depuis plus de dix ans, inaccessible depuis septembre 2019. Est-ce que cela cache un accident ou bien est-ce que la mise hors ligne de cette base de données résulte de tentatives de piratage, comme l'indiquent les autorités chinoises ? Impossible de répondre, mais l'OMS devrait avoir accès aux données des séquençages de l'Institut de virologie de Wuhan.

C'est dans cette base de données qu'on trouverait les séquences des virus récupérés dans la mine dont beaucoup ont parlé ?

En effet, les scientifiques pensent qu'il doit y avoir des séquences de virus collectés en différents endroits, dont la mine que vous citez. Rappelons les faits. En 2003, les mesures sanitaires prises très rapidement après l'émergence du SRAS ont évité qu'il ne dégénère en pandémie mondiale. Depuis cette époque, la Chine se

D'où vient le Covid-19 ? D'un accident de laboratoire *(à gauche)* ? Ou d'une zoonose classique ? Dans tous les cas, les chauves-souris fer à cheval du genre *Rhinolophus* sont le réservoir des virus apparentés au SARS-CoV-2. Ici, l'espèce *Rhinolophus affinis (à droite)* chez qui on a retrouvé l'un de ses plus proches cousins, le RaTG13.

livre à un travail d'enquête pour comprendre comment ce coronavirus a émergé. Dans ce contexte, des chercheurs ont montré que les reliefs karstiques du Yunnan, en Chine, qui s'étendent jusqu'au nord du Laos, hébergent des colonies de chauves-souris infectées par des coronavirus ayant un potentiel de franchissement de la barrière d'espèce.

En 2013, six personnes qui collectaient du guano de chauve-souris (un engrais naturel très recherché) sont tombées sévèrement malades dans cette province du Yunnan. Elles souffraient de pneumonies atypiques sévères et ont été hospitalisées ; trois sont décédées.

Ces mineurs ont-ils contracté un coronavirus ? Ce serait alors une première preuve de la transmission directe de SARS-CoV. Ou bien les mineurs ont-ils été victimes d'une infection fongique, comme certains le soutiennent ? On sait seulement que ces mineurs avaient développé des anticorps spécifiques des coronavirus.

C'est à partir de ces incidents que cette mine est considérée comme un *hot spot* d'investigation par l'Institut de virologie de Wuhan pour rechercher des coronavirus susceptibles d'infecter les humains. Certains pensent que le progéniteur du SARS-CoV-2 serait le virus qui a infecté ces mineurs. La transmission interhumaine n'a toutefois pas été détectée en 2013, suggérant que si c'était une infection à coronavirus, ce dernier était mal adapté aux transmissions interhumaines – peut-être en raison de l'absence d'un site furine.

Parmi les virus collectés dans cette mine, on sait que figure le virus RaTG13, mais aussi une troisième branche de coronavirus, le RaTG15, distincte du SARS-CoV-1 et du SARS-CoV-2. Donc d'autres virus collectés dans cette mine sont indéniablement d'intérêt ; reste à connaître leur histoire complète et leur séquence.

BIBLIOGRAPHIE

S. Temmam *et al.*, **Bat coronaviruses related to SARS-CoV-2 and infectious for human cells,** *Nature*, 2022.

Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19), 28 février 2020. https://bit.ly/3vNoYI2

B. Hu *et al.*, **Discovery of a rich gene pool of bat SARS-related coronaviruses provides new insights into the origin of SARS coronavirus,** *Plos Pathogens*, 2017.

Pour revenir aux accidents de recherche, connaît-on des antécédents ?

Plusieurs sont décrits dans la littérature, par exemple pour le SARS-CoV-1, quatre contaminations d'expérimentateurs ont été reliées à des recherches et plus récemment une contamination par le SARS-CoV-2 a été documentée. Si on détecte un virus dont la séquence correspond exactement à celle d'une souche expérimentale utilisée dans un laboratoire plusieurs années avant, on peut être sûr que c'est une contamination de laboratoire, car les virus mutent en continu dans les hôtes infectés. Ce type d'approche a d'ailleurs récemment révélé un autre accident de laboratoire, sans que l'on sache précisément où il a eu lieu. Il concerne la grippe de 1977 qui a fait au moins 700 000 morts. Des années après, en séquençant le virus incriminé, et d'autres plus anciens, des chercheurs ont démontré que le virus de 1977 ressemblait à un virus qui circulait vingt-huit ans plus tôt…

Dans l'hypothèse d'un accident de laboratoire, quelles leçons doit-on tirer ?

Avec les expériences de gain de fonction, la question centrale est de savoir si elles sont pertinentes, nécessaires et utiles au vu des risques encourus. Il n'y a pas de consensus. À supposer que l'on décide de les poursuivre, dans quelles conditions de biosécurité doivent-elles se faire ? Cela pose la question clé de la régulation. Revenons au moratoire décrété aux États-Unis. La conséquence en a été que des expériences de gain de fonction sur les coronavirus en laboratoire de type P4 ont été délocalisées dans des pays où la réglementation est moins contraignante. Finalement, réguler seulement dans une partie du monde augmente probablement les risques d'expériences non maîtrisées.

Pour les moyens de contrôles, nous avons aujourd'hui les capacités technologiques d'identifier les agents pathogènes présents dans les laboratoires. Par exemple, il est possible de séquencer des prélèvements ou les filtres des hottes pour pister et tracer les activités d'un laboratoire ; et on pourrait envisager la création de « boîtes noires biologiques » dans les laboratoires P3 et P4, à la façon de celles qui équipent les avions. Pour l'instant, rien n'est fait. Reste à voir ce que la communauté internationale jugera nécessaire afin de limiter les risques biologiques.

Un frein important aux mesures de régulation est lié au financement de la recherche. En effet, les nouvelles mesures de régulation ne sont jamais adossées aux moyens financiers nécessaires pour les mettre en œuvre. La recherche s'en trouve ralentie, voire arrêtée dans certains domaines pourtant importants du point de vue de la santé publique… ■

Propos recueillis par Loïc Mangin

© Binturong-tonoscarpe/Shutterstock

L'ESSENTIEL

> Pendant des décennies, l'endométriose, une maladie dans laquelle le tissu qui tapisse l'utérus colonise d'autres organes, a été ignorée.

> Pourtant, elle touche quelque 190 millions de femmes dans le monde, entraînant des douleurs chroniques et parfois l'infertilité.

> Mais depuis quelques années, cette pathologie fait l'objet d'un nombre croissant de recherches.

> Des pistes de diagnostic non invasif et de traitements plus personnalisés de cette pathologie multiforme laissent espérer une meilleure prise en charge de la maladie.

L'AUTRICE

JENA PINCOTT
écrivaine et journaliste scientifique à New York

ENDOMÉTRIOSE une maladie caméléon

Enfin la communauté médicale attaque sur tous les fronts cette pathologie multiforme douloureuse qui touche 10 % des femmes en âge de procréer dans le monde.

Chaque femme atteinte d'endométriose se souvient de la première fois où elle a su que la douleur ressentie dans le bas de son abdomen était anormale. Pour Emma, cela remonte au jour où elle s'est évanouie en cours, au lycée. La sensation s'apparentait à celle d'une citrouille dont on gratte les entrailles. Son gynécologue a supposé qu'elle souffrait de fortes douleurs menstruelles et lui a prescrit une pilule contraceptive. Cela l'a aidée, mais pas suffisamment. « Il m'a donné l'impression que j'étais un peu folle, raconte Emma (le prénom a été changé), aujourd'hui âgée d'une trentaine d'années. » Elle a dû attendre six ans pour qu'un médecin lui recommande une laparoscopie de l'abdomen – un examen de la paroi intérieure à l'aide d'une fibre optique. Alors seulement, elle a appris qu'elle souffrait d'endométriose, une maladie dans laquelle le tissu qui tapisse l'utérus, l'endomètre, s'en échappe et prend racine dans d'autres parties du corps. La muqueuse avait alors déjà colonisé ses organes pelviens.

Tout comme la vigne asiatique kudzu, devenue envahissante dans nombre de régions du monde, s'enroule autour des arbres et des arbustes, étouffant tout sur son passage, les cellules endométriales égarées s'implantent hors de l'utérus et s'y multiplient, formant des nodules, des kystes ou des adhérences entre les organes. Ces lésions envahissent la vessie, les intestins, les tubes de l'uretère menant aux reins et d'autres organes pelviens. Souvent, lorsqu'on les enlève par chirurgie, elles repoussent : plus de la moitié des femmes ayant subi une telle intervention reviennent dans les sept ans pour une nouvelle opération. Durant l'intervention, les chirurgiens observent parfois les intestins, les ovaires et le nerf sciatique piégés dans un macramé de tissu endométrial.

Malgré les dégâts manifestes que l'endométriose cause, cette maladie reste un mystère. Les médecins savent qu'elle a une composante héréditaire et qu'elle est associée à plusieurs

© Katherine Streeter

variants génétiques, mais détecter ces variants dans le génome ne suffit pas pour expliquer son apparition ni prédire son évolution (*voir* Une pathologie éclairée par la génomique, *page 58*). De plus, le degré d'adhérence entre les organes, le nombre et l'emplacement des lésions ne sont pas corrélés à la gravité des symptômes qui, outre la douleur, incluent saignements abondants, gêne lors des rapports sexuels et de la défécation, voire infertilité. De même, les traitements n'ont pas toujours l'effet escompté. Si certaines patientes trouvent un soulagement dans la chirurgie et les médicaments, d'autres, même avec peu de lésions, essaient tous les remèdes connus sans que leur douleur diminue pour autant.

Pendant des décennies, l'endométriose a été ignorée. Mais il y a quelques années, les combats pour les droits des patientes, l'activisme sur les médias sociaux et les mouvements féministes ont attiré l'attention sur la question, et la communauté médicale a commencé à reconnaître qu'elle avait toujours sous-estimé les problèmes de santé des femmes. Aujourd'hui, des chercheurs développent des outils pour étudier les origines complexes de l'endométriose, la diagnostiquer et concevoir des traitements ciblés.

L'ÉNIGME DE L'INVASION

« Tout d'abord, comment les tissus sortent-ils de l'utérus ? », demande Linda Griffith, professeuse à l'institut de technologie du Massachusetts. À la fois directrice scientifique du centre de recherche sur les pathologies gynécologiques de l'institut et patiente atteinte d'endométriose, elle s'intéresse de près à cette question. Personne ne sait avec certitude comment ou pourquoi des cellules endométriales apparaissent hors de l'endomètre.

La théorie dominante, dite « de la régurgitation », remonte à près d'un siècle. John Sampson, un gynécologue américain, a observé que du liquide menstruel contenant des cellules de l'utérus peut remonter les trompes de Fallope. Il a alors formulé l'hypothèse suivante : des fractions de ce fluide se colleraient aux organes pelviens et à la paroi abdominale, ou flotteraient dans le liquide pelvien et se propageraient vers des sites éloignés. Cela arriverait à presque toutes les femmes et, en temps normal, le système immunitaire éliminerait ces éléments. Mais parfois, les cellules s'implanteraient à l'endroit où elles se seraient posées. Le tissu mal placé agirait alors comme s'il était encore dans l'utérus : il produirait des récepteurs hormonaux et répondrait aux signaux hormonaux. Chaque mois, il se développerait en même temps que la muqueuse utérine, sécréterait des hormones et se détacherait à la fin du cycle, mais le sang et les tissus resteraient piégés dans le bassin et déclencheraient une inflammation. Avec le temps, l'inflammation conduirait à la formation d'adhérences.

Depuis cette proposition de Sampson, les chercheurs sont divisés sur la cause de la maladie. Le défaut se situe-t-il dans la « graine », les cellules endométriales rebelles, ou dans le « sol », l'environnement abdominal où ces cellules s'implantent et se propagent ? Les thèses en faveur de la graine accusent des cellules endométriales ou des cellules souches défectueuses. Celles en faveur du sol affirment que l'endométriose est avant tout un dysfonctionnement immunitaire. Une troisième interprétation coupe la poire en deux en proposant que le sol modifie la graine. « Les femmes atteintes d'endométriose auraient des cellules endométriales normales jusqu'à ce que certaines s'implantent et créent des changements dans le tissu », explique Linda Griffith. L'inflammation associée perturberait le contrôle hormonal de la croissance des cellules endométriales, ce qui favoriserait celle-ci. À l'appui de cette thèse, lors d'une expérience menée en 2006, des chercheurs ont réussi à provoquer l'endométriose en injectant une muqueuse utérine normale dans la cavité pelvienne de femelles babouins.

> **Il est probable qu'il n'y ait pas une seule maladie, mais plusieurs**

Il est en fait probable qu'il n'y ait pas une seule maladie, mais plusieurs. Les symptômes surviennent parfois dès le premier jour des premières règles, soit bien avant que des lésions dues aux menstruations aient pu se développer. Selon plusieurs chercheurs, les patientes concernées auraient eu un flux rétrograde de cellules endométriales pendant le saignement vaginal qui se produit souvent chez les bébés peu après la naissance. Ou alors des cellules endométriales ou des cellules souches se seraient retrouvées à l'extérieur de l'utérus durant le développement fœtal, et auraient parfois atteint les poumons ou le cerveau (on a détecté des traces de ces cellules errantes dans des fœtus avortés ou ayant subi une fausse couche). À l'instar du cancer, l'endométriose aurait donc de nombreuses causes et manifestations.

Une constante est cependant la douleur. Une des choses les plus difficiles à entendre pour les femmes atteintes est que celle-ci est

«dans leur tête». De fait, le corps médical a toujours minimisé la souffrance féminine. En 2008, une étude menée à l'université de Pennsylvanie à Philadelphie a révélé que les femmes attendent plus longtemps que les hommes dans les salles d'urgence avant de recevoir un traitement pour la même douleur abdominale, et qu'elles ont 13 à 25% moins de chances que leurs homologues masculins de recevoir des analgésiques opioïdes. Une étude antérieure portant sur des patients atteints de maladies cardiaques a révélé que les infirmiers étaient plus enclins à administrer des analgésiques aux hommes et à donner des sédatifs aux femmes. Et même lorsque les femmes reçoivent un analgésique, le médicament pourrait être moins sûr et moins efficace pour elles, car nombre d'études sur la douleur ont été menées sur des hommes ou des souris mâles.

UN ÉCOSYSTÈME DE DOULEUR

Une raison pour laquelle médecins – et patientes – minimisent la douleur causée par l'endométriose est que celle-ci se manifeste pendant les menstruations, au moment où les femmes sont «censées» se sentir mal. «La douleur est très subjective. Les crampes sont la seule douleur considérée comme "normale", et il est difficile de savoir quand cette douleur est anormale», explique Hugh Taylor, directeur du département d'obstétrique, de gynécologie et des sciences de la reproduction à la faculté de médecine de l'université Yale, aux États-Unis. De plus, les normes sociales ont empêché les discussions ouvertes sur les douleurs menstruelles, lors des rapports sexuels ou de la défécation, qui sont autant de signaux d'alarme de l'endométriose. «Heureusement, dit-il, ces obstacles disparaissent.»

Les experts s'accordent à dire que trop de médecins passent encore à côté de cette pathologie, par manque d'information. Et lorsque l'endométriose n'est pas diagnostiquée, elle s'aggrave souvent. «Le tissu endométrial mal placé présente une concentration plus élevée d'aromatase, une enzyme qui rend l'hormone œstrogène majoritaire dans les lésions, ce qui favorise leur croissance», explique Pamela Stratton, gynécologue et chirurgienne des Instituts américains de la santé. Les lésions deviennent aussi résistantes à la progestérone, ce qui empêche cette hormone de freiner la croissance de l'endomètre et de combattre l'inflammation. Par conséquent, l'inflammation règne: des prostaglandines (des molécules de signalisation qui se forment plus vite lorsque des tissus sont endommagés) et des protéines pro-inflammatoires appelées «cytokines» agissent sur les terminaisons nerveuses et augmentent la sensibilité à la douleur. Avec le temps, des adhérences se forment et interfèrent avec la fonction des organes pelviens, provoquant davantage de douleur.

EN CHIFFRES

10 %
L'endométriose touche environ 10 % des femmes en âge de procréer dans le monde selon l'Organisation mondiale de la santé, soit environ 190 millions de femmes.

11 heures
Les douleurs et autres symptômes liés à cette maladie réduisent la productivité des femmes de près de 11 heures par semaine – 7 % d'une semaine de 40 heures – selon une étude sur plus de 1 400 femmes dans dix pays, publiée en 2011 par le consortium international Global Study of Women's Health.

14 milliards
Les coûts sociétaux de la maladie – directs comme les soins de santé et indirects comme la perte de productivité au travail – s'élèvent à 72 milliards d'euros par an aux États-Unis et à 14 milliards d'euros en France, selon une étude réalisée en 2012 par la World Endometriosis Research Foundation et réévaluée en 2016 en tenant compte de l'inflation.

14 millions
Le financement de la recherche sur cette maladie reste sans commune mesure avec ses coûts sociétaux. En 2021, les États-Unis ont attribué 14 millions d'euros à cette recherche, alors que le budget de celle consacrée à la lutte contre le diabète s'élevait à plus d'un milliard d'euros. Les deux maladies touchent à peu près la même proportion de personnes.

Une caractéristique étrange de la douleur associée à l'endométriose est qu'elle est peu liée à la gravité des lésions ou à leur localisation. Une femme présentant peu de lésions peut avoir l'impression que ses organes pelviens sont pulvérisés dans un hachoir à viande, alors qu'une patiente au «stade IV» de la maladie, avec des grosseurs dépassant de son ventre, ne ressentira aucune douleur. Certaines lésions, comme celles qui touchent la paroi musculaire de l'utérus (on parle alors d'«adénomyose») sont par ailleurs difficiles à voir lors de l'intervention chirurgicale, alors que les patientes souffrent le martyre. Enfin, pour de nombreuses femmes, la douleur persiste même après la résorption des lésions ou leur ablation chirurgicale.

À ce stade, le problème est devenu un trouble du système nerveux central, explique Pamela Stratton. Le cerveau a géré des signaux de douleur pendant si longtemps qu'il ne peut plus s'arrêter. Dans cet état, appelé «sensibilisation centrale», le câblage neuronal s'est remodelé pour être «attentif à la douleur». Toute perturbation mineure, y compris l'ovulation, les menstruations et les rapports sexuels, déclenche et perpétue la douleur. Pamela Stratton explore des traitements pour atténuer ces douleurs et annuler la sensibilisation centrale. Son idée est que si un médicament parvenait à soulager les patientes pendant une période prolongée, le système nerveux central serait en mesure de réinitialiser son seuil de douleur. Elle mène actuellement des recherches sur la toxine botulique. Injectée dans le plancher pelvien, le groupe de muscles situé à la base du bassin, cette neurotoxine bloque la transmission des signaux nerveux aux muscles, ce qui empêche la survenue des spasmes et donc, peut-être, perturbe des molécules impliquées dans la signalisation de la douleur. Les premiers essais cliniques, publiés en 2019 et 2021, suggèrent que le traitement est efficace, et ce, pendant plus d'un an chez certaines patientes. Il s'agit à présent de consolider ces travaux à plus grande échelle.

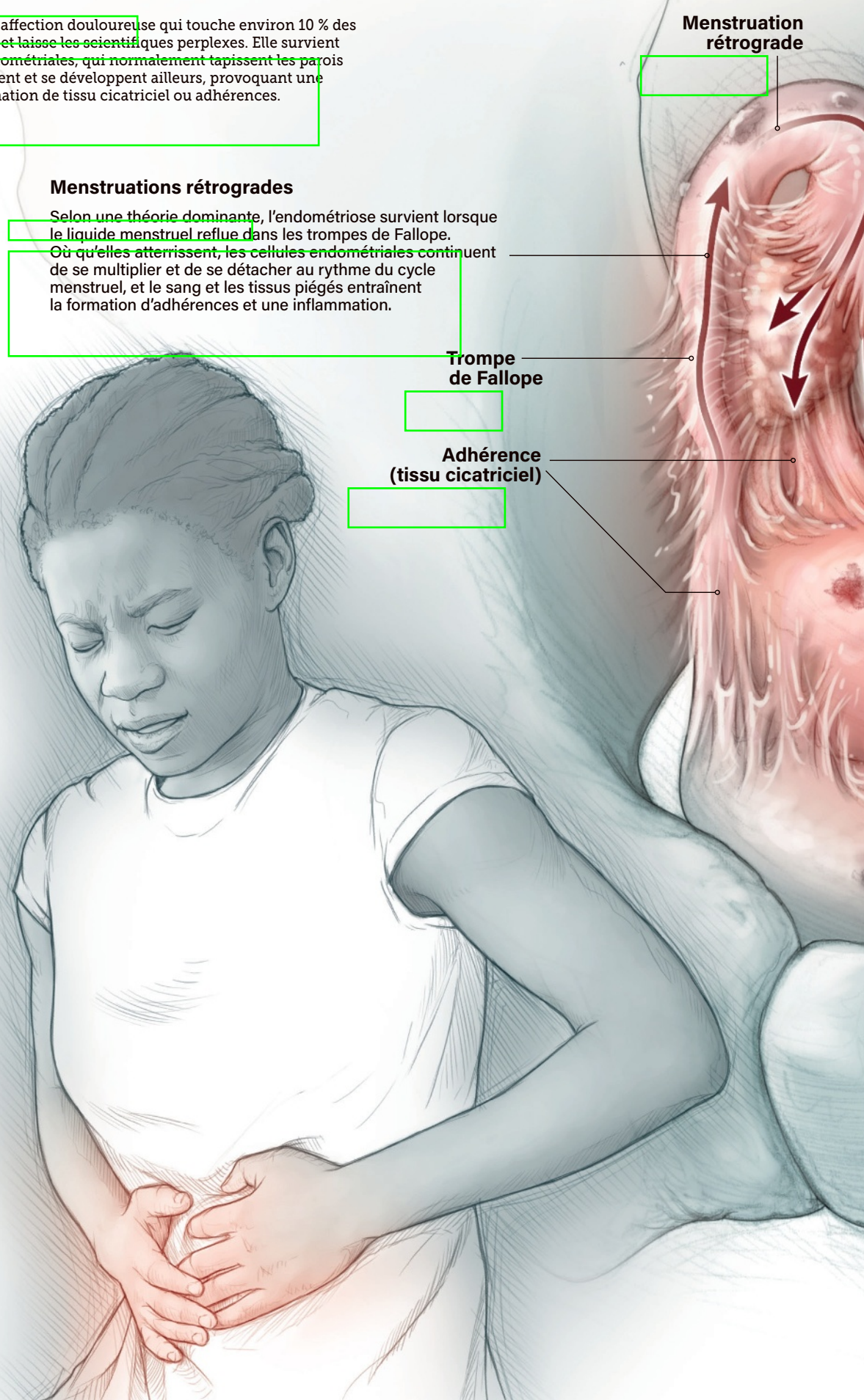
Les enjeux sont importants. La douleur chronique entraîne insomnie, anxiété, dépression, irritabilité et brouillard cérébral. Plusieurs études de neuro-imagerie ont révélé des modifications de la matière grise de patients souffrant de douleurs chroniques, notamment une perte de volume dans l'hippocampe (qui expliquerait les troubles de la mémoire) et dans le cortex préfrontal (qui serait responsable des déficits cognitifs et de régulation de la douleur observés). En 2004, en suivant des patients souffrant de douleurs dorsales chroniques, des chercheurs de l'université Northwestern, dans l'Illinois, ont ainsi comparé la perte de volume de la matière grise – 1,3 centimètre cube par an – aux effets de dix à vingt ans de vieillissement normal. Les femmes atteintes d'endométriose n'échappent

UNE INVASION DOULOUREUSE

L'endométriose est une affection douloureuse qui touche environ 10 % des femmes dans le monde et laisse les scientifiques perplexes. Elle survient lorsque des cellules endométriales, qui normalement tapissent les parois de l'utérus, s'en échappent et se développent ailleurs, provoquant une inflammation et la formation de tissu cicatriciel ou adhérences.

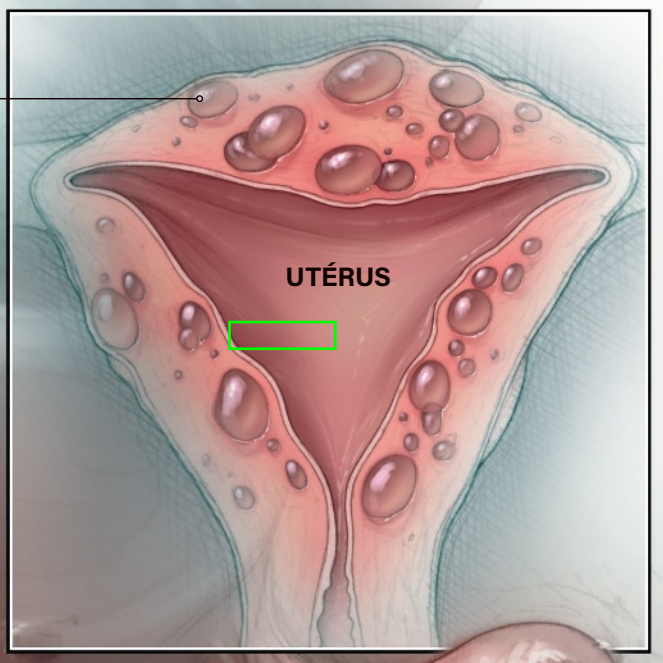
Menstruations rétrogrades

Selon une théorie dominante, l'endométriose survient lorsque le liquide menstruel reflue dans les trompes de Fallope. Où qu'elles atterrissent, les cellules endométriales continuent de se multiplier et de se détacher au rythme du cycle menstruel, et le sang et les tissus piégés entraînent la formation d'adhérences et une inflammation.



Adénomyose

Lorsque le tissu endométrial se développe dans la paroi musculaire de l'utérus, le diagnostic est souvent difficile et douloureux, car il n'existe pas de moyen simple de prélever le tissu.



Adhérence (tissu cicatriciel)

INTESTIN

Lésions endométriales

UTÉRUS

OVAIRE

VESSIE

PELVIS

Trompe de Fallope pincée

Les adhérences endométriales, formées de tissu cicatriciel, sont parfois si développées qu'elles engloutissent et compriment les organes, jusqu'à pincer un ovaire ou une trompe de Fallope et bloquer le passage d'un ovule. C'est une des façons dont cette maladie perturbe la fertilité.

Kyste de chocolat (endométriome)

Il arrive que du tissu endométrial s'accumule en une masse qui repose sur un ovaire. Potentiellement douloureux, ces kystes sont susceptibles d'endommager l'ovaire, voire de l'empêcher de libérer des ovules.

© David Cheney

pas à ce processus : en 2012, une étude sur une soixantaine de femmes, dont des patientes souffrant d'endométriose et de douleurs pelviennes chroniques, a révélé chez ces dernières un rétrécissement du thalamus, de l'insula et d'autres régions cérébrales associées à la modulation de la douleur.

UN FLÉAU POUR LA FERTILITÉ

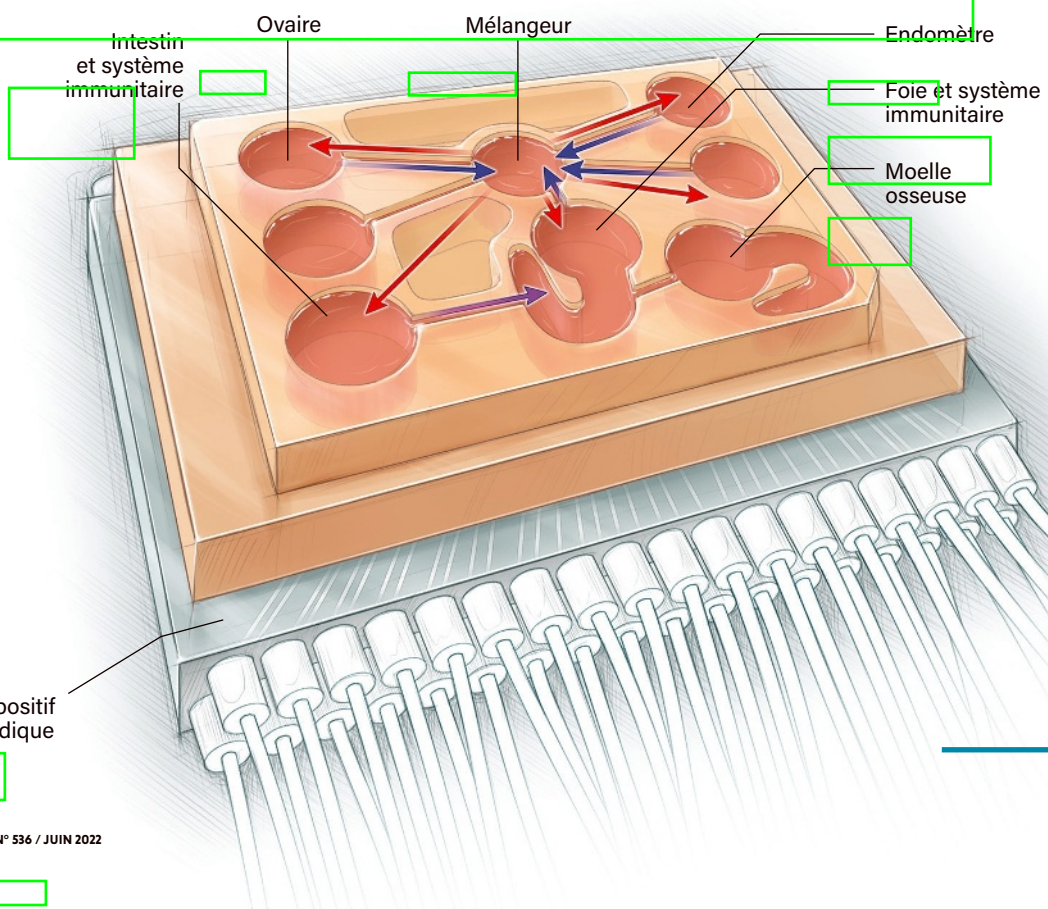
L'infertilité est une des principales craintes des femmes atteintes d'endométriose. Environ la moitié des femmes infertiles souffrent de cette maladie. Il arrive qu'une obstruction de la trompe de Fallope empêche l'ovule de passer de l'ovaire à l'utérus, ou qu'une inflammation due à une cicatrice ou à une intervention chirurgicale autour des ovaires compromette la qualité et la quantité des follicules ovariens, les agrégats de cellules qui contiennent les ovules. Des cytokines pro-inflammatoires et d'autres éléments présents dans le liquide qui entoure les organes pelviens – le liquide péritonéal – sont par ailleurs susceptibles de réduire la mobilité des spermatozoïdes dans les trompes de Fallope et d'endommager les ovules et les embryons.

Les hormones aussi sont parfois touchées. La conception est une symphonie hormonale et immunologique ; mais avec l'endométriose, le chef d'orchestre a disparu. Habituellement, après l'ovulation, la concentration de récepteurs des œstrogènes dans la paroi utérine diminue, ce qui prépare la paroi pour la nidation. La concentration de progestérone augmente, ce qui prépare la muqueuse endométriale à recevoir l'ovule fécondé et à le nourrir. L'hormone calme l'utérus et empêche les contractions. Mais, chez une femme atteinte d'endométriose, la muqueuse utérine est résistante à la progestérone et l'hormone concurrente, l'œstradiol, reste dominante, ce qui contribue à rendre l'environnement moins propre à la nidation. Même si l'implantation a lieu, la résistance à la progestérone augmente le risque de fausse couche et de naissance prématurée.

Pour ajouter à la complexité du problème, l'endomètre héberge un microbiote – un ensemble de microorganismes –, qui se dérègle aussi en cas d'endométriose. Des études récentes suggèrent que, chez la plupart des femmes, ce microbiote est majoritairement

DES ORGANES SUR UNE PUCE

Plusieurs équipes conçoivent des versions miniatures d'organes (ou organoïdes) pour tester des traitements contre l'endométriose. Ces avatars, appelés « organes sur puce » *(ci-dessous PhysioMimetics, développé à l'institut de technologie du Massachusetts)*, contiennent des cellules vivantes qui seront exposées à des hormones, médicaments et autres molécules. Chaque plateforme présente un ensemble de mini-organes importants pour les processus pathologiques et une chambre de mélange (mélangeur) qui simule la circulation systémique. Ici, la muqueuse utérine (endomètre) et l'ovaire sont reliés à l'intestin, au foie et à la moelle osseuse, qui interviennent dans le métabolisme des médicaments et la réponse immunitaire.



© David Cheney

constitué de bactéries *Lactobacillus*, qui joueraient un rôle dans l'implantation et le soutien de l'embryon en croissance. Une hypothèse est que l'inflammation chronique causée par l'endométriose tuerait les lactobacilles, créant un déséquilibre microbien dans l'utérus qui perpétuerait l'inflammation et l'infertilité potentielle. En 2016, une enquête préliminaire d'Inmaculada Moreno, de l'université Stanford, en Californie, et ses collègues auprès de 35 femmes suivant une procédure de fécondation *in vitro* a révélé que lorsque des bactéries autres que les lactobacilles dominent, comme c'est le cas dans l'endométriose, les chances que l'embryon s'implante sont trois fois plus faibles et le nombre de fausses couches augmente.

Il arrive néanmoins que l'issue soit heureuse. Environ 43 à 55 % des patientes atteintes d'endométriose (selon le stade de la maladie) sont enceintes au bout d'un cycle de fécondation *in vitro* et, une fois l'embryon implanté, les chances que le bébé naisse en vie sont similaires à celles pour les femmes non touchées. Dans le milieu hormonal de la grossesse, les symptômes disparaissent généralement. L'allaitement est lui aussi lié à un risque moindre d'endométriose. Une étude publiée en 2017, issue d'un ensemble de données portant sur plus de 70000 femmes américaines, a en effet montré que pour chaque période de trois mois d'allaitement exclusif, le risque de développer la maladie diminue de 14 % par rapport à un allaitement de moins d'un mois. Une étude menée en 2021 en Italie suggère par ailleurs que l'allaitement exclusif réduit les symptômes des femmes qui souffraient déjà d'endométriose avant leur grossesse et diminue la taille des kystes ovariens associés.

BIENTÔT UN DIAGNOSTIC SANGUIN ?

Comprendre l'origine de la maladie et ce qui influe sur son évolution est une chose, la diagnostiquer et la traiter en est une autre. Actuellement, le délai entre l'apparition de la douleur et le diagnostic reste très long – sept ans en moyenne –, en partie parce que ce dernier nécessite une intervention chirurgicale. La maladie serait dépistée beaucoup plus tôt si un simple test sanguin, salivaire ou urinaire, suffisait à l'identifier. Mais quel signal rechercher ?

Ces dernières années, plusieurs laboratoires se sont concentrés sur les microARN, de courtes séquences non codantes d'ARN qui régulent l'expression des gènes et sont excrétées par les tissus. À partir de 2016, le groupe de Hugh Taylor en a identifié six dont les quantités diffèrent dans le sang des patientes atteintes d'endométriose par rapport aux sujets témoins. L'entreprise du chercheur, DotLab, utilise ces microARN comme base du premier test sanguin ou salivaire pour diagnostiquer l'endométriose. Après une première étude encourageante en 2020, DotLab a lancé un essai clinique sur une cohorte de 750 femmes, dont les premiers résultats devraient être disponibles cet automne.

Plusieurs équipes travaillent aussi à améliorer la prise en charge de la maladie. Pour Julie Kim, professeuse d'obstétrique et de gynécologie à l'université Northwestern, dans quelques années le traitement d'une patiente nouvellement diagnostiquée débutera peut-être avec une biopsie de la peau. Les cellules recueillies à partir d'un minuscule prélèvement cutané sur la cuisse ou la hanche seraient modifiées pour devenir des cellules souches pluripotentes induites, capables de se transformer en n'importe quelle cellule de l'organisme : cellules endométriales, hépatiques, rénales, etc. Chaque type cellulaire serait utilisé pour ensemencer un « micro-organe » sur un circuit électrique de la taille d'une tablette représentant son corps – son avatar médical.

Plusieurs avatars d'organes sur puce existent déjà. Celui que Julie Kim a construit avec son équipe, Evatar, est un appareil reproducteur féminin miniature, avec des micro-ovaires, des trompes de Fallope, un utérus, un col de l'utérus et un foie. Comme d'autres avatars de patients, les micro-organes d'Evatar sont logés dans des vaisseaux de taille minuscule qui reposent sur une plaque reliée à un ordinateur. Du sang artificiel circule dans des microcanaux qui relient les organes, transportant de l'un à l'autre hormones, nutriments, facteurs de croissance et agents immunitaires. Une patiente munie d'un Evatar saurait grâce à lui quels médicaments sont les plus susceptibles de l'aider. Le laboratoire de Julie Kim a fourni une preuve de concept de l'Evatar et travaille depuis à développer cet outil.

Pour Linda Griffith, créer des avatars pour chaque patiente aura un coût prohibitif. Elle espère plutôt classer les femmes atteintes d'endométriose en fonction de plusieurs marqueurs moléculaires, comme pour le cancer du sein, et développer des médicaments qui cibleraient chaque catégorie ainsi définie. Il n'y aurait alors besoin que d'un avatar par type d'endométriose pour les tester. La plateforme d'organes sur puce que son équipe développe, nommée PhysioMimetics, connecte jusqu'à dix mini-organes sur un circuit intégré, dont un minuscule endomètre (*voir l'encadré page ci-contre*).

Malgré ces promesses, la communauté médicale a encore beaucoup de chemin à parcourir. Comme le kudzu, l'endométriose est difficile à maîtriser. Pour la vaincre, il faudra un effort concerté des chercheurs et des médecins, ainsi qu'un véritable engagement financier d'une société enfin prête à prendre cette maladie au sérieux. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Stratton *et al.*, **Randomized, placebo-controlled trial of botulinum toxin for endometriosis-related chronic pelvic pain,** *Fertility and Sterility*, 2021.

R. Prosperi Porta *et al.*, **Effects of breastfeeding on endometriosis-related pain : A prospective observational study,** *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021.

I. Moreno *et al.*, **Evidence that the endometrial microbiota has an effect on implantation success or failure,** *Am. J. Obstet. Gynecol.*, 2016.

S. As-Sanie *et al.*, **Changes in regional gray matter volume in women with chronic pelvic pain : A voxel-based morphometry study,** *Pain*, 2012.

L'ESSENTIEL

> En étudiant le génome de patientes atteintes d'endométriose, on a identifié pour l'heure quelque 25 gènes dont des variants prédisposent très fortement les femmes à développer la maladie.

> Ces gènes sont impliqués dans des fonctions diverses comme l'immunité, le métabolisme des hormones ou l'adhérence entre cellules.

> Les gènes, cependant, n'expliquent pas tout. Chez 50 % des cas, la cause est à chercher dans l'environnement des cellules dont le fonctionnement est perturbé.

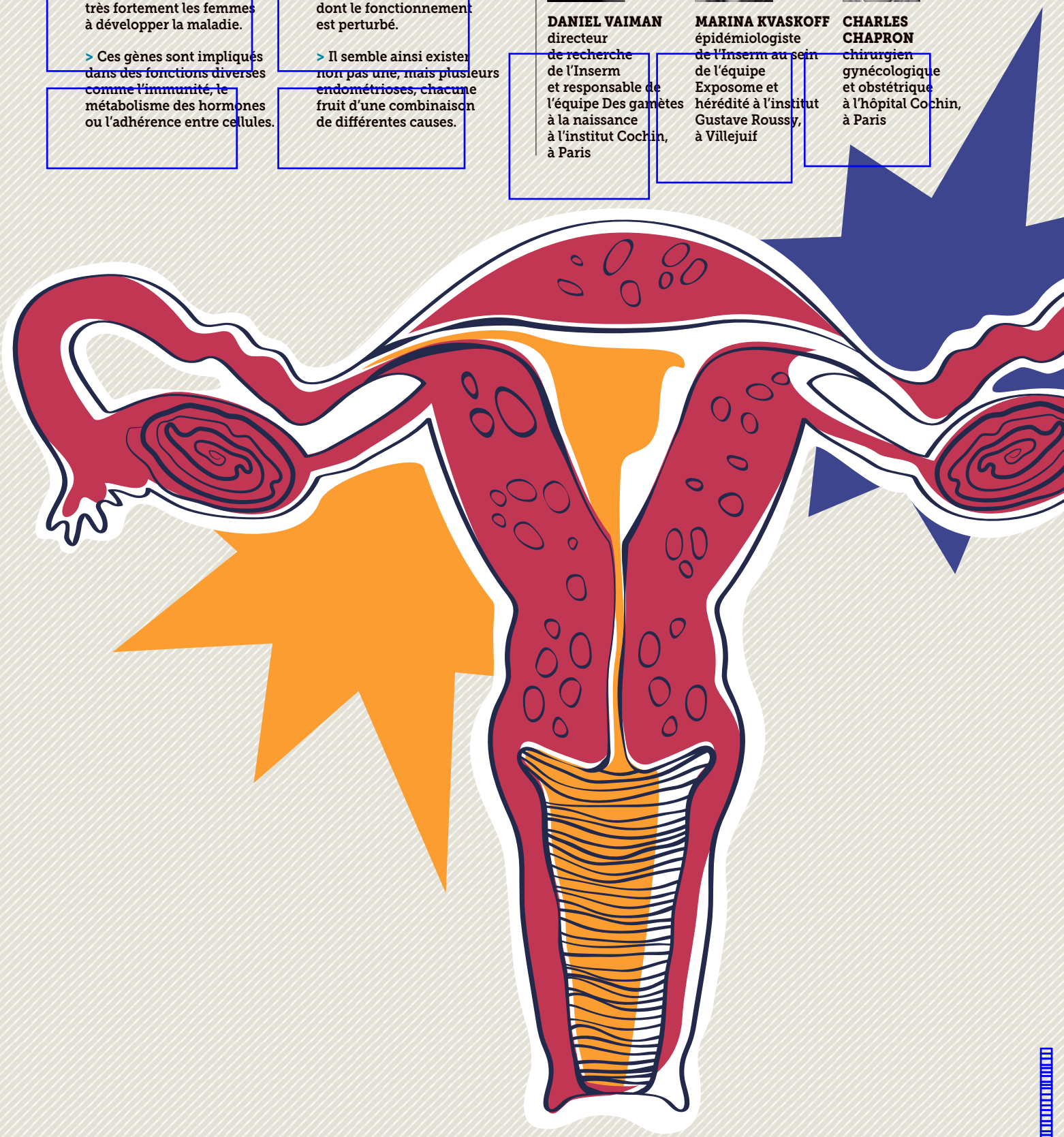
> Il semble ainsi exister non pas une, mais plusieurs endométrioses, chacune fruit d'une combinaison de différentes causes.

LES AUTEURS

DANIEL VAIMAN
directeur de recherche de l'Inserm et responsable de l'équipe Des gamètes à la naissance à l'institut Cochin, à Paris

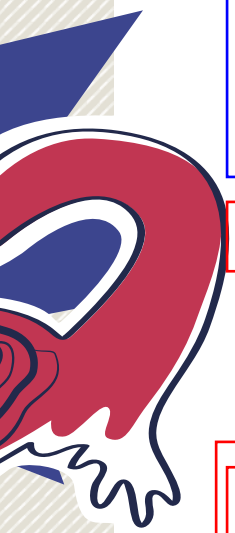
MARINA KVASKOFF
épidémiologiste de l'Inserm au sein de l'équipe Exposome et hérédité à l'institut Gustave Roussy, à Villejuif

CHARLES CHAPRON
chirurgien gynécologique et obstétrique à l'hôpital Cochin, à Paris



Une pathologie éclairée par la génomique

Grâce aux techniques de séquençage à haut débit, un portrait plus précis de l'endométriose se dessine et révèle une maladie complexe et hétérogène.



Dans le roman *Belle du Seigneur* (1968), Albert Cohen donne la parole à l'un de ses personnages souffre-douleurs, Adrien Deume, fonctionnaire inefficace et peu zélé de la Société des nations (ancêtre infortunée de l'ONU), fier d'expliquer à son épouse, l'adorable Ariane, toutes les occasions qu'il a d'économiser son énergie en prenant des congés :

« D'abord, chaque mois, le jour d'absence dont tout fonctionnaire peut bénéficier sans certificat médical, article trente et un du statut du personnel. Tu penses bien que j'en profite. (Il nota.) Ci, douze jours de repos supplémentaire par an ! (Une explication est nécessaire. Ledit article trente et un visait en fait certaine indisposition féminine, mais les pudiques rédacteurs du statut du personnel n'avaient pas osé le spécifier. En conséquence, les fonctionnaires mâles avaient aussi le droit d'être indisposés un jour par mois, sans avoir à fournir de justification médicale.) »

Les douleurs des femmes pendant les règles étaient et sont encore considérées comme une donnée, une réalité reflétant une situation normale. Pourtant, certaines femmes ne souffrent pas pendant leurs menstruations et, au contraire, d'autres connaissent des douleurs insupportables, à des niveaux extrêmement forts, assimilables sur des échelles individuelles à celles de l'accouchement, de coliques néphrétiques ou de fractures osseuses. Cette réalité, probablement mâtinée de considérations philosophico-religieuses sur la nécessaire souffrance des filles d'Ève, a été amplifiée par la prosopopée des paroles des prophètes dans les exégèses de la Bible. La masculinité sans partage de la profession médicale jusqu'au début du XXe siècle a sans doute aggravé cette perception, qui a rendu inaudible le tourment des femmes concernées et a empêché de progresser dans la compréhension biologique et médicale de celui-ci.

À partir du début des années 1920, cependant, des tentatives de définition clinique de ces douleurs intenses sont apparues et ont abouti à l'identification d'un syndrome distinct et particulier, l'endométriose. Outre les douleurs pendant les règles (dysménorrhées), les patientes atteintes de cette maladie sont susceptibles de souffrir pendant les rapports sexuels (dyspareunies), la défécation, la miction, voire en permanence. Depuis une vingtaine d'années, la prise en compte médicale de cette maladie s'améliore sans discontinuer et les recherches pour la comprendre et la traiter se multiplient. Aujourd'hui, le portrait qui se dessine est celui d'une pathologie chronique complexe, hétérogène et multifactorielle susceptible de débuter dès le développement embryonnaire.

L'endométriose est caractérisée par l'implantation de tissu utérin modifié en dehors de la cavité utérine – on parle de « position ectopique », par opposition à sa position naturelle, « eutopique ». Comme le tissu eutopique, le

© Lerusea/Shutterstock

ET LA POLLUTION ?

En 1999, dans un essai intitulé *The Curse* (« La Malédiction ») destiné à briser le tabou sur l'évocation des règles dans la littérature, l'écrivaine américaine Karen Houppert évoque l'endométriose, la liant possiblement à l'exposition à la dioxine, un polluant persistant dans l'environnement. Ce sujet avait connu une certaine couverture médiatique dans les années 1990. L'impact subtil de l'environnement sur l'endométriose n'est pas clair, les études conduites jusqu'à présent étant hétérogènes. Cependant, les dernières métaanalyses mettent en évidence des associations avec certaines dioxines, des polychlorobiphényles et des pesticides organochlorés.

tissu ectopique répond aux hormones sexuelles et se déploie progressivement au rythme des cycles. Les lésions apparaissent sur les ovaires (endométriome ovarien) ou en différents sites de la cavité abdominale (sur les ligaments utérosacrés, qui fixent l'utérus au sacrum, sur les parois vaginale, rectale, vésicale, ou encore sur le péritoine, membrane qui tapisse l'abdomen, le pelvis et les viscères) et cela de façon superficielle ou profonde. Chez au moins 30% des patientes (avec ou sans lésions extra-utérines), des lésions affectent spécifiquement le muscle utérin. On parle alors d'adénomyose. Les lésions abdominales d'endométriose sont plus fréquentes du côté gauche du pelvis: en 2011, une étude de 77 patientes dans un centre de fécondation *in vitro* à Düsseldorf, en Allemagne, a montré que 55,8% d'entre elles présentaient des lésions seulement à gauche, 6,5% seulement à droite et 37,7% des deux côtés.

Cette distribution suit la circulation normale du liquide qui enveloppe les organes dans la cavité abdominale – le liquide péritonéal – et les endroits de stase de ce fluide, comme la poche de Douglas, cul-de-sac joignant les parois externes de l'utérus et du gros intestin. Mais dans des cas rares, on détecte des lésions au-dessus du diaphragme, sur les poumons ou la plèvre, une membrane qui recouvre ces derniers et la paroi thoracique intérieure. Il est donc vraisemblable que dans certains cas, les lésions soient dues à la migration de cellules utérines dans la circulation sanguine.

DE MULTIPLES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

Les facteurs exogènes connus de prédisposition à la maladie sont peu nombreux et variés: âge précoce aux premières règles, cycles menstruels courts, faible nombre d'enfants, faible poids de naissance... D'autres facteurs sont à l'étude, comme l'indice de masse corporelle, l'alimentation, l'activité physique, ou l'absorption de tabac, de caféine ou d'alcool, mais les données actuellement disponibles ne permettent pas d'établir de lien clair. Cette multiplicité des facteurs possibles de risque suggère qu'il n'existe pas une, mais *des* endométrioses. Ce que confirme la recherche de marqueurs de la maladie.

La douleur est, avec l'infertilité, l'un des effets majeurs qui caractérisent cette pathologie. Une piste pour la diagnostiquer consiste donc à essayer de connecter le ressenti des patientes avec des marqueurs objectifs. Dans l'endométriose, on distingue trois principaux types de douleurs: les dysménorrhées, les dyspareunies et les douleurs pelviennes non menstruelles. Toutefois, non seulement la douleur est une notion éminemment subjective, mais les chercheurs n'utilisent pas toujours la même échelle de douleur dans leurs études. Surtout, la douleur n'est pas systématique dans l'endométriose et n'est pas forcément corrélée à la taille des lésions. Une hypothèse est que les différences seraient liées à l'innervation de ces dernières, qui varierait selon les patientes. Avec des collègues, nous avons ainsi montré en 2010 chez 12 patientes opérées pour une endométriose douloureuse que plusieurs gènes impliqués dans la neurogenèse étaient surexprimés dans les lésions par rapport à l'endomètre eutopique, ce qui suggère que les facteurs de croissance neuronale qu'ils codent interviennent dans l'apparition des douleurs. Néanmoins, nous n'avons pas observé de différence évidente d'expression des mêmes gènes entre les patientes qui éprouvaient une douleur plus intense et les autres. Ainsi, même si ces gènes constituent des marqueurs potentiels de la maladie, ils ne suffisent probablement pas à distinguer les différents types d'endométriose.

À LA RECHERCHE DES CAUSES DE LA MALADIE

Une étude que nous avons menée en 2016 montre à quel point la recherche de marqueurs de la maladie est compliquée. Lors de cette étude, nous avons examiné si des corrélations apparaissaient entre la description clinique de 113 patientes – caractéristiques de la maladie, antécédents, facteurs de risque – et l'étude histologique des lésions. Nous avons regardé en particulier (à l'aide de marquages immunologiques) les quantités, dans ces tissus, de plusieurs protéines connues pour avoir une production perturbée dans l'endométriose. Résultat: un profil de marquage de ces différentes protéines était corrélé avec des endométrioses pour lesquelles la base génétique était importante (plusieurs femmes de la même famille étaient affectées); en revanche, le profil opposé était associé à la tabagie. En d'autres termes, certaines endométrioses sont déterminées par la génétique et d'autres, par l'environnement, ce qui influe sur la signature moléculaire protéique que présentent les lésions. En somme, l'épidémiologie comme les marqueurs moléculaires nous renvoient un

Source de l'encadré : G. Cano-Sancho et al., Environ. Int., vol. 123, pp. 209-223, 2019

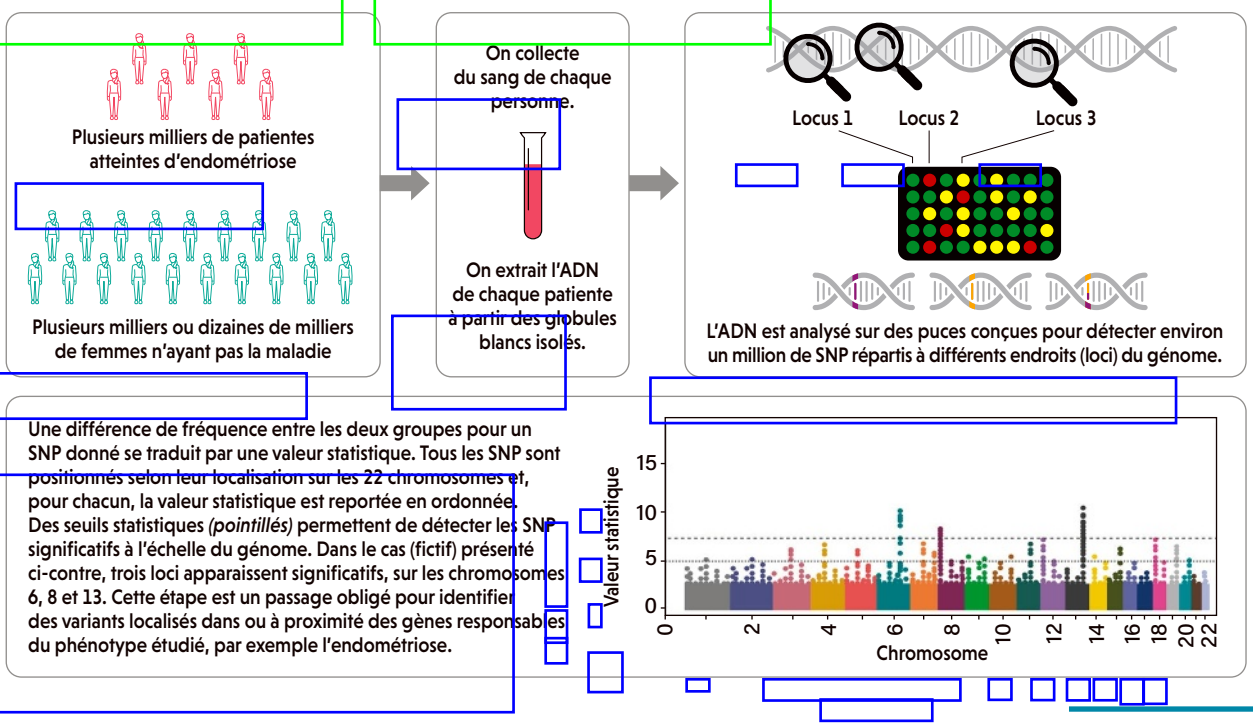
tableau ultracomplexe de la pathologie. Aussi la caractérisation et la compréhension des différentes formes de la maladie représentent-elles un des défis majeurs de la recherche sur l'endométriose.

C'est d'abord du côté de l'anatomie que l'on a recherché les origines de cette maladie. La plus ancienne explication avancée, énoncée il y a près d'un siècle, est la théorie de la régurgitation du gynécologue américain John Sampson : la distribution anatomique des lésions dans la cavité abdominopelvienne serait liée à l'implantation de cellules dans la cavité à la suite d'un reflux du liquide menstruel par les trompes de Fallope. Puis d'autres hypothèses ont peu à peu contribué à décrire cette maladie énigmatique et ses manifestations : des troubles de l'immunité empêcheraient l'organisme d'éliminer les cellules envahisseuses ; des cellules souches qui, normalement, reconstituent le tissu utérin à chaque cycle, continueraient de remplir leur fonction hors de l'utérus ; des restes des précurseurs embryologiques de l'utérus et du vagin – les canaux de Müller – se redifférencieraient en tissu utérin ectopique… Sans oublier les migrations cellulaires par voie sanguine ou lymphatique, susceptibles de déposer des cellules endométriales hors de l'utérus – un mécanisme qui incite à considérer l'endométriose comme une pathologie métastatique bénigne. Il est probable que, selon les patientes, l'une ou l'autre de ces causes intervienne, voire plusieurs…

Depuis quelques années, cependant, les médecins explorent le génome des patientes à la recherche de profils plus à risque de développer la maladie. La première étape a consisté à mesurer l'héritabilité de l'endométriose, c'est-à-dire la part génétique de la maladie. Pour évaluer ce paramètre, on étudie la transmission de la pathologie dans des familles ou entre individus apparentés. Différentes études épidémiologiques de cohortes de patientes ont ainsi abouti à une héritabilité de l'endométriose d'environ 50 %. Par

L'ARSENAL GWAS À L'ASSAUT DE L'ENDOMÉTRIOSE

Les nouvelles méthodes de biologie moléculaire permettent d'analyser simultanément des centaines de milliers, voire des millions de variants du génome, notamment ponctuels – les polymorphismes d'un seul nucléotide ou SNP. C'est grâce à de telles études, nommées GWAS pour *genome wide association studies* ou études d'association pangénomique, que l'on identifie les gènes de prédisposition à l'endométriose. En moyenne, dans les trois milliards de bases qui composent le génome humain, il existe trois millions de différences ponctuelles entre deux humains pris au hasard. Nombre d'entre elles n'ont pas d'effet visible et servent de repères dans les études GWAS. Grâce à ces bornes, on a identifié plus de 3 000 gènes responsables de maladies monogéniques. Avec l'accroissement de la connaissance du génome humain, l'analyse de ces polymorphismes est de plus en plus fine et son coût a considérablement diminué, ce qui a récemment ouvert aux généticiens la possibilité d'explorer des pathologies polygéniques comme l'endométriose. La méthode consiste à identifier de façon systématique des variants associés à un phénotype (en l'occurrence la maladie) et donc probablement localisés à proximité du groupe de gènes impliqué dans le phénotype analysé.



© GoperVector/Shutterstock ; Alhovik/Shutterstock ; Lyi Luch/Shutterstock ; VoodooDot/Shutterstock ; Daniel Vaiman (graphique)

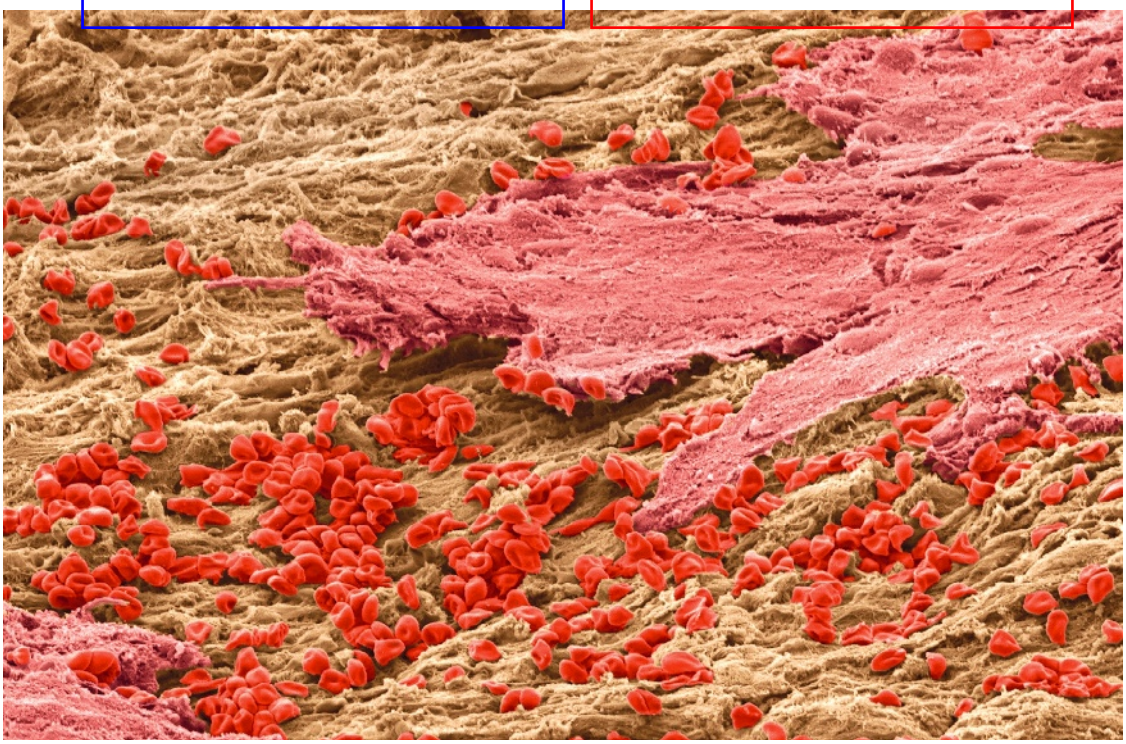
exemple, en 2015, Rama Saha, de l'institut Karolinska, à Stockholm, et ses collègues ont analysé 28370 femmes, jumelles monozygotes ou dizygotes, et ont conclu à une héritabilité de 47%, contre 53% d'effets environnementaux, c'est-à-dire de facteurs autres que génétiques influant sur la survie, le développement et l'évolution.

UNE MULTITUDE DE GÈNES IMPLIQUÉS

La génétique de l'endométriose est bien sûr complexe et il est certain que l'on ne pourra identifier des altérations d'un gène majeur expliquant tous les cas, ou même une majorité de ceux-ci. Néanmoins, à partir des années 2010, grâce aux nouvelles techniques de séquençage à haut débit, plusieurs équipes ont entrepris une série d'études massives et systématiques pour identifier les gènes de prédisposition à l'endométriose. Baptisées GWAS (*genome wide association studies* ou études d'association pangénomique), ces études sont fondées sur une approche appliquée aujourd'hui pour de très nombreuses maladies au déterminisme génétique complexe, comme l'endométriose (*voir l'encadré page 61*). Elles ont permis d'identifier une petite trentaine de gènes, dont 54 variants ponctuels – des « polymorphismes d'un seul nucléotide » ou SNP – prédisposent à l'endométriose. Ces gènes interviennent dans diverses fonctions biologiques: certains sont impliqués dans la régulation des processus inflammatoires ou la réponse immunitaire, d'autres dans la croissance des vaisseaux sanguins (l'angiogenèse), d'autres encore dans le métabolisme des hormones sexuelles, l'adhérence entre cellules ou la régulation de la mort cellulaire programmée.

Toutefois, il ne suffit pas de repérer les variants qui prédisposent à l'endométriose. Il faut aussi comprendre comment ces variants contribuent à expliquer la part génétique de la maladie. Certains variants auraient-ils un poids statistique plus important que d'autres? Le génome humain contient deux copies – ou allèles – de chaque gène et il paraît plausible que chacune des versions à risque des allèles contribue au risque de développer une endométriose. Une façon simple (sans doute trop) de voir les choses est de considérer un modèle additif, où les différents variants à risque joignent leurs effets. Déjà, cependant, partant de cette hypothèse simple, on se heurte à des considérations mathématiques complexes.

Soient deux gènes notés A et B, chacun présentant deux variants notés A_1 et A_2 pour A, et B_1 et B_2 pour B. Imaginons que A_1 et B_1 augmentent chacun le risque de développer une endométriose de 5%, tandis que A_2 et B_2 n'ont pas d'effet. Si la probabilité d'endométriose dans la population totale est de 0,1 (ou 10%), une femme porteuse du variant A_1 sur un allèle de son gène A aura une probabilité de développer une endométriose de $0{,}1+0{,}1\times0{,}05$, soit 0,105. Si son génome compte un deuxième



L'endomètre *(en rose sur cette photo prise en microscopie électronique à balayage)* est le tissu cellulaire qui se développe dans l'utérus durant le cycle menstruel. Lors de l'ovulation, soit un œuf fécondé s'implante dans ce tissu, soit il se désquame, provoquant les règles. Dans l'endométriose, ce tissu se développe hors de la cavité utérine.

© Steve Gschmeissner/Science Photo Library

allèle A_1, on peut envisager que cela augmente à nouveau le risque de 5%. La probabilité passe donc à 0,105+0,105×0,05, soit 0,11025. Et si, chez la même patiente, B_1 induit en plus un risque de même ampleur, deux allèles B_1 induiront un risque de 0,12155, qui sera donc le risque d'une patiente porteuse de deux allèles A_1 et deux allèles B_1.

Ce modèle simpliste présente de nombreuses limites, l'une d'elles étant que, en prenant en compte suffisamment de variants, on peut dépasser une probabilité de 1. Une autre limite, biologique celle-ci, est que le risque relatif auquel cette patiente malchanceuse est exposée par rapport à une patiente porteuse homozygote des deux autres allèles (c'est-à-dire le rapport des risques pour chacune) est de seulement 1,21. Il serait donc irréaliste d'utiliser cette seule information en vue d'une application clinique individuelle dans le cadre d'une médecine personnalisée.

Par exemple, il y a quelques mois, l'équipe de Krina Zondervan, à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, a identifié un gène – le gène *NPSR1*, qui code un récepteur impliqué dans l'inflammation – dont un variant particulier est associé à une forme sévère d'endométriose. De plus, les auteurs ont montré que, dans une endométriose induite chez la souris, un inhibiteur de ce récepteur atténue la progression de la maladie, l'inflammation et la douleur. Cependant, une limite de ce travail est que le risque induit par la mutation n'est que de 1,23, ce qui signifie que sur 100 patientes porteuses du « mauvais » variant, 12 développeront la maladie, contre seulement 10 dans la population générale. En d'autres termes, si l'inhibiteur est commercialisé, il ne soulagera à lui seul qu'une petite population de patientes. Chaque gène impliqué n'est qu'une part additionnelle du puzzle génétique de l'endométriose.

LA MATIÈRE NOIRE DE LA PART GÉNÉTIQUE

Actuellement, les études génomiques à haut débit ont permis d'identifier quelque 25 gènes très fortement associés au risque d'endométriose. Pourtant, tous ces gènes dans leur ensemble expliquent moins de 20% du risque génétique d'endométriose. Il y a plusieurs explications à cette « matière noire » de l'héritabilité, probablement plus complémentaires qu'antagonistes. L'une d'elles est la mauvaise prise en considération de la variabilité des endométrioses des patientes incluses dans les études GWAS. On déduit en effet des protocoles utilisés que toutes les patientes de ces vastes études ont été placées dans un grand sac stochastique. Or l'endométriose est une pathologie hétérogène qui se présente sous différents types; sans une classification précise de ceux-ci, la « chasse génétique » entreprise dans les GWAS revient à rechercher un ours blanc sur toute la Terre, sans restreindre le territoire aux zones glacées de l'Arctique et avec, de surcroît, une idée très approximative de ce à quoi ressemble un ours blanc.

Un autre aspect aggrave encore le problème: le groupe contrôle contient certainement une proportion de patientes souffrant d'endométriose non détectée, asymptomatique ou non. L'outil de repérage des ours blancs active son propre brouilleur! De fait, une meilleure définition clinique des patientes permet de détecter d'autres gènes liés à l'endométriose. En 2012, en comparant le génome de 127 patientes souffrant d'endométriome ovarien sans autre lésion avec celui de 317 femmes contrôles chez qui l'absence de lésion avait été confirmée, nous avons mis en évidence des variants d'un gène (le

ENDOMÉTRIOSE ET PATHOLOGIES DE LA GROSSESSE

La viviparité implique l'interaction intime et durable de deux organismes génétiquement disjoints, la mère et l'embryon, puis le fœtus. La complexité des mécanismes de dialogue entre l'endomètre et le placenta mis en jeu dans cette tolérance suggère que de petites altérations de l'équilibre construit suffisent à induire un échec reproductif. Or les lésions de l'endométriose sont corrélées avec des anomalies de la physiologie de l'endomètre eutopique : on observe des altérations de la méthylation (une modification chimique de l'ADN) dans ce tissu associées à des dérégulations de l'expression de gènes impliqués dans la prolifération cellulaire, l'inflammation, l'angiogenèse et la réponse aux hormones sexuelles.

On pourrait donc penser que l'impact de l'endométriose sur les mécanismes d'implantation ne fait aucun doute. Pourtant, cette idée a été longtemps débattue, comme l'attestent deux articles de synthèse publiés en miroir dans la revue *Fertility and Sterility* en 2017. Ce débat inattendu au sujet des liens entre endométriose et pathologies obstétricales résulte probablement du fait que nombre d'études reposent sur peu d'individus. Néanmoins, cette limite disparaît totalement dans une étude de Leslie Farland, de l'université de l'Arizona à Tucson, et ses collègues parue en 2019 et fondée sur une population massive de patientes. L'équipe s'est appuyée sur le suivi de 196 722 grossesses de 116 429 femmes, avec 8 875 endométrioses confirmées chirurgicalement. Une aggravation des conséquences obstétricales est manifeste : chez les personnes atteintes de la maladie, le taux d'avortement spontané augmente de 40 %, les grossesses ectopiques de 46 %, la mortinatalité de 27 %, les diabètes gestationnels de 35 %, les pathologies hypertensives de la grossesse de 30 %, les naissances prématurées de 16 %, et les faibles poids de naissance de 16 %. Des résultats cohérents avec ceux d'une récente métaanalyse de 33 études rassemblant un total de 3 280 488 patientes.

Ces deux études épidémiologiques ne fournissent pas d'interprétation mécanistique. On peut néanmoins supposer que les différences d'expression des gènes dans l'utérus jouent un rôle dans une implantation et une placentation défectueuses. Une autre observation contribue peut-être aussi à expliquer les risques accrus : les lésions d'endométriose sont connues pour se positionner sur les organes abdominaux et le péritoine ; nous avons cependant démontré en 2015 que, chez des patientes atteintes de la maladie, des lésions s'installent aussi sur les membranes fœtales du côté maternel. Ces lésions pourraient contribuer à certains risques identifiés comme suites de la grossesse, en particulier la rupture prématurée des membranes.

L. V. Farland *et al.*, Endometriosis and risk of adverse pregnancy outcomes, *Obstet. and Gynecol.*, 2019.

L. Marcellin *et al.*, Endometriosis also affects the decidua in contact with the fetal membranes during pregnancy, *Hum. Reprod.*, 2015.

gène *DNMT3L*, qui code une enzyme clé de la régulation de l'expression des gènes) associés à la maladie, dont un qui induit un risque relatif de 7,15. Un tel niveau de risque serait exploitable en clinique, mais il ne s'applique qu'à un sous-ensemble des patientes. Ce type de résultat suggère qu'une médecine personnalisée nécessite et nécessitera une information clinique détaillée en même temps qu'une caractérisation génétique, insuffisante à elle seule.

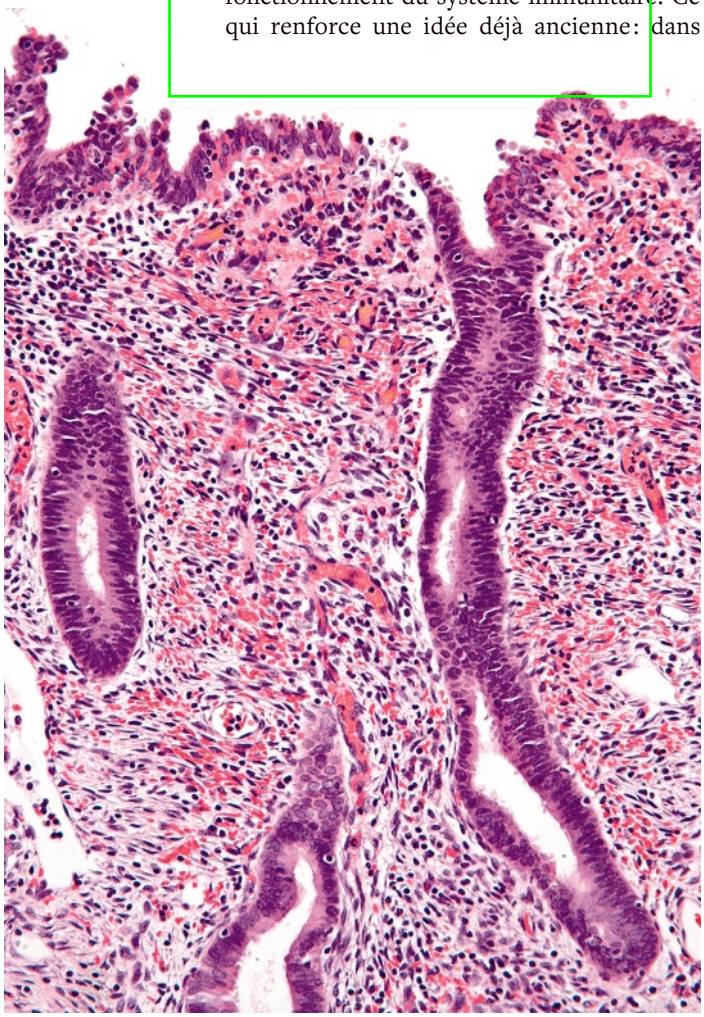
Une deuxième explication de la matière noire de l'héritabilité est qu'il n'existe probablement pas de variants génétiques majeurs impliqués dans la pathologie. À l'inverse, l'endométriose pourrait relever du modèle dit « ultramultigénique ». Dans ce modèle utilisé en agronomie, un caractère complexe (ici la maladie) est dû à un nombre très important de gènes (un millier par exemple), et c'est l'ensemble de ces gènes qui permet la réalisation du phénotype par un effet quantitatif cumulatif. Si tel est le cas avec l'endométriose, il reste l'espoir d'identifier de façon exhaustive tous les variants impliqués dans la maladie à l'aide d'outils génomiques adéquats, à un prix qui pourrait chuter. Pour cela, il faudra développer des outils de statistique mathématique adéquats, capables d'assigner un génotype donné à un type d'endométriose et de connecter cette forme de la maladie à une approche thérapeutique pertinente et rigoureusement adaptée à la patiente.

DES ALTÉRATIONS ÉPIGÉNÉTIQUES

Une troisième explication est l'impact de l'environnement sur l'expression des gènes. La présence d'un variant dans le génome ne conduit pas forcément à la production d'une protéine de séquence différente. Pour qu'un gène s'exprime, il faut en effet qu'il soit positionné dans une région active du génome. Or l'activation de ces régions dépend d'un système complexe de régulation – la machinerie épigénétique. Cette mécanique implique des centaines de gènes codant des protéines qui agissent directement sur l'ADN sans en modifier sa séquence (par exemple en ajoutant des groupements méthyl ou en supprimant de telles molécules en divers endroits) ou indirectement en modifiant d'autres protéines avec lesquelles il interagit, comme les histones (les protéines échafaudages autour desquelles il est enroulé et compacté). Sans oublier les gènes qui codent des protéines capables de modifier des ARN (des produits de l'expression des gènes) et en particulier de produire de petits ARN régulateurs – des microARN – et d'autres ARN non codants susceptibles d'ajuster l'expression des gènes. Et cet imbroglio biomécanique est lui-même influencé par l'environnement au sens large – cellules avoisinantes, paramètres physiques, paramètres biologiques ou endocriniens.

En somme, l'épigénétique a le potentiel de déconnecter la variation héréditaire de son expression. Ce mécanisme explique pourquoi l'héritabilité de pathologies complexes comme l'endométriose ne dépasse en général pas 50%. Diverses équipes ont en effet observé des différences épigénétiques entre les lésions d'endométriose et l'utérus eutopique. En particulier, les patientes qui développent la maladie présentent des altérations épigénétiques dans les cellules les plus abondantes de l'utérus, les cellules souches qui se différencient en cellules de l'endomètre au cours du cycle ovarien, ainsi qu'une hyperactivation de la fonction des hormones œstrogènes. Les récepteurs des œstrogènes étant des médiateurs de méthylation et déméthylation de l'ADN, certaines altérations épigénétiques observées dans l'endométriose seraient une conséquence de cette dérégulation hormonale.

Il n'en reste pas moins primordial de traquer les variants génétiques impliqués dans l'endométriose, notamment parce qu'ils orientent les recherches vers certains processus biologiques. Ainsi, plusieurs variants pointent vers un dysfonctionnement du système immunitaire. Ce qui renforce une idée déjà ancienne: dans



Les lésions d'endométriose *(ici des lésions observées sur une coupe histologique du col de l'utérus)* sont des amas de cellules endométriales modifiées qui se positionnent à des endroits anormaux et parfois créent des adhérences entre organes.

© Nephron/Wikimedia Commons

l'hypothèse de Sampson, l'apparition de lésions d'endométriose trouve sa source dans l'implantation de menstrues rétrogrades. Cependant, au moins 90% des femmes présentent un flux rétrograde. Pourquoi, dans ce cas, l'endométriose n'affecte-t-elle qu'environ 10% des femmes en âge de procréer? Pour expliquer cette bizarrerie, une hypothèse est que le système immunitaire ne serait pas assez efficace pour détruire le tissu ectopique, qui ne se résorberait donc plus suffisamment chez les patientes.

UN SYSTÈME IMMUNITAIRE DÉBORDÉ

De fait, dans l'endométriose, on détecte des altérations du processus inflammatoire. En temps normal, lorsque l'organisme subit une agression microbienne ou physique, des cellules immunitaires produisent de nombreuses molécules – des cytokines – qui modulent l'immunité. Mais chez les patientes atteintes de la maladie, le fonctionnement de cytokines pro-inflammatoires comme les interleukines-6 et -8 ou le TNF-α est perturbé. Notre équipe a été la première à montrer, en 2012, une augmentation de l'interleukine-33 dans le plasma et le liquide péritonéal des femmes souffrant d'une endométriose. Cette cytokine proche de l'interleukine-1, un médiateur majeur de l'inflammation, active différentes cellules immunitaires. En 2019, à la suite de ces travaux, une équipe japonaise a montré chez des souris qu'un inhibiteur de cette cytokine était capable d'empêcher la formation de lésions et a suggéré de cibler cette voie pour traiter la maladie.

En dehors de ces dérégulations cytokiniques, on observe par ailleurs de façon globale des altérations de l'activité des cellules immunitaires chez les patientes. En particulier, les risques de développer une endométriose et une maladie auto-immune sont liés. La logique sous-jacente est patente: les maladies auto-immunes (comme le lupus, la sclérose en plaques, la polyarthrite rhumatoïde, la sclérodermie, certaines hypothyroïdies) affectent en majorité les femmes (sans qu'une raison définitive soit actuellement avancée) et impliquent une attaque des tissus du soi par le système immunitaire. Les lésions d'endométriose portent bien sûr des antigènes du soi (des molécules qui attestent qu'elles font partie de l'organisme). Or chez la majorité des patientes atteintes de la maladie, elles sont elles aussi détruites.

Des défauts du système immunitaire interviendraient donc peut-être à plusieurs étapes. D'abord, les systèmes de surveillance dans l'utérus seraient mis en échec, autorisant des fragments d'endomètre à s'installer par exemple sur l'ovaire ou le péritoine. Puis ces cellules ectopiques induiraient une cascatelle d'activations de cytokines, accompagnée d'un affadissement de la réponse de différents groupes de cellules immunitaires. Selon une hypothèse récente, une voie de cet aveuglement orchestré du système immunitaire serait liée à l'activation d'une population de cellules immunitaires, les cellules myéloïdes suppressives. La concentration de ces cellules, qui modèrent l'inflammation en bloquant diverses populations de cellules immunitaires, est en effet plus élevée dans le sang périphérique des patientes atteintes d'endométriose.

Enfin, des études émergent qui suggèrent que la composition du microbiote anogénital – les microorganismes qui peuplent l'intestin et le système génital – serait un facteur de risque pour l'endométriose, peut-être en perturbant les défenses antimicrobiennes et en produisant un état inflammatoire, deux mécanismes susceptibles de déréguler le système immunitaire et de favoriser le développement de la maladie. Une piste qui reste à explorer...

Il y a une dizaine d'années la prise en charge de l'endométriose passait très souvent par la chirurgie, après un diagnostic fondé sur une laparoscopie. L'imagerie diagnostique a depuis fait d'immenses progrès. Avec une meilleure prise en compte de la pathologie, les examens cliniques constituent un troisième pilier diagnostique, et c'est là que la génétique peut apporter sa contribution, grâce à la connaissance de variants de prédisposition, mais aussi de biomarqueurs facilement accessibles dans les liquides biologiques des patients (plasma, urine, etc.). Ces différents outils diagnostiques combinés devraient à terme permettre de prédire l'évolution de la maladie et de planifier un calendrier de soin adapté à chaque patiente, dans un projet personnalisé de vie de femme incluant l'hormonologie, la gestion de la douleur et de l'infertilité, et la chirurgie. Tout récemment, Sofiane Bendifallah, à l'hôpital Tenon, et ses collègues ont proposé d'utiliser une combinaison de 109 microARN quantifiés dans la salive des patientes pour prédire l'endométriose. Bien qu'encore préliminaire, elle offre un aperçu des outils qui un jour seront disponibles et réduiront considérablement l'errance diagnostique des patientes. ■

Plusieurs variants pointent vers un dysfonctionnement du système immunitaire

BIBLIOGRAPHIE

S. Bendifallah *et al.*, **Salivary microRNA signature for diagnosis of endometriosis,** *J. Clin. Med.*, 2022.

D. Szukiewicz *et al.*, **Estrogen- and progesterone (P4)-mediated epigenetic modifications of endometrial stromal cells (EnSCs) and/or mesenchymal stem/stromal cells (MSCs) in the etiopathogenesis of endometriosis,** *Stem Cell Rev. Rep.*, 2021.

C. Chapron *et al.*, **Rethinking mechanisms, diagnosis and management of endometriosis,** *Nat. Rev. Endocrinol.*, 2019.

L. Vassilopoulou *et al.*, **Defining the genetic profile of endometriosis,** *Exp. Therapeut. Med.*, 2019.

M. Peyneau *et al.*, **Role of thyroid dysimmunity and thyroid hormones in endometriosis,** *PNAS*, 2019.

A. L. Shafrir *et al.*, **Risk for and consequences of endometriosis : A critical epidemiologic review,** *Best Pract. Res. Clin. Obstet. Gynaecol.*, 2018.

T. Zhang *et al.*, **The link between immunity, autoimmunity and endometriosis : A literature update,** *Autoimmun. Rev.*, 2018.

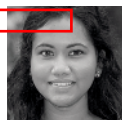
L'ESSENTIEL

> Les systèmes alimentaires actuels épuisent certaines ressources naturelles et contribuent au réchauffement, tandis que de nombreuses populations souffrent de malnutrition et de carences.

> En 2019, une commission d'experts internationale, EAT-Lancet, a proposé une formule de régime alimentaire bonne à la fois pour la santé et pour l'environnement.

> Ce régime reste coûteux et parfois éloigné des pratiques alimentaires réelles. Un écart que des nutritionnistes du monde entier travaillent à réduire.

L'AUTRICE



GAYATHRI VAIDYANATHAN
journaliste scientifique indépendante

FUTUR ALIMENTAIRE

Quel régime pour la planète ?

Le régime alimentaire idéal doit nourrir correctement sans menacer les ressources naturelles. Des chercheurs tentent de le déterminer en fonction de la situation de chaque pays, depuis le Kenya jusqu'à la Suède.

Des poissons-perroquets, des poulpes et d'autres espèces marines comestibles peuplent les eaux de la côte près de Kilifi, au Kenya. Pourtant, les enfants des villages de pêcheurs côtiers se nourrissent très peu des produits de la mer. Leur alimentation, surtout végétale, a pour base principale une préparation traditionnelle de l'est de l'Afrique que l'on nomme *ugali* : un mélange de farine de maïs et d'eau. Résultat : la croissance de près de la moitié des enfants des villages est retardée – deux fois plus que la moyenne nationale.

Les recherches en nutrition montrent pourtant que le poisson et les aliments d'origine animale améliorent la croissance. Alors, en 2020, avec des collègues kenyans, Lora Iannotti, une chercheuse en santé publique de l'université Washington de Saint Louis, dans le Missouri, a interrogé les villageois pour découvrir pourquoi l'alimentation des enfants comportait si peu de produits de la pêche. Les parents ont expliqué qu'il était plus rentable pour eux de vendre leurs prises, plutôt que de les consommer.

L'équipe de chercheurs a alors entrepris une expérience contrôlée. Elle a doté les pêcheurs de nasses modifiées afin que de petites ouvertures permettent aux jeunes poissons de s'échapper. Le but : améliorer le renouvellement de la ressource et, par là, protéger les zones récifales déjà surexploitées, explique Lora Iannotti, afin qu'à long terme les prises augmentent. Des « agents de santé communautaires » – des membres de la communauté

© mmatasic (Marko Matasic)/Getty Images

formés pour promouvoir la santé – rendent régulièrement visite à la moitié des familles incluses dans l'étude, pour montrer comment cuisiner davantage de produits de la mer et encourager leur emploi pour nourrir leurs enfants. Ils s'appuient en particulier sur la consommation d'espèces de poissons locales abondantes et à croissance rapide, comme le *tafi*, autrement dit le picot à taches blanches (*Siganus canaliculatus*) et le poulpe. Après un laps de temps suffisant, les chercheurs évalueront si les enfants des familles ayant adopté le régime alimentaire amélioré sont mieux nourris et grandissent davantage que les autres. Lora Iannotti explique que l'objectif de l'expérience est de comprendre « comment choisir des produits de la mer d'une façon optimale à la fois pour le régime alimentaire et pour l'écosystème ». La chercheuse ajoute que la diète choisie doit aussi être abordable et culturellement acceptable pour les populations.

La chercheuse s'empare ainsi de questions qui préoccupent non seulement les chercheurs, mais aussi les Nations unies, les bailleurs de fonds internationaux et nombre de pays à la recherche de régimes alimentaires bénéfiques pour l'humanité et pour la planète. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'humains sont en surpoids ou obèses – en Occident surtout –, tandis que 811 millions d'habitants des pays à revenu faible ou intermédiaire sont chroniquement sous-alimentés. En 2017, les régimes alimentaires néfastes ont contribué à davantage de décès dans le monde que tout autre facteur, le tabagisme compris. Selon la FAO – la Food and Agriculture Organization, l'Organisation pour l'agriculture et l'alimentation des Nations unies –, l'augmentation de la population mondiale et le fait que de plus en plus d'humains se mettent à manger comme les Occidentaux impliquent que la production de viande, de produits laitiers et d'œufs devra augmenter de quelque 44 % d'ici à 2050. Cette tendance menace la santé, mais aussi l'environnement. Les filières agroalimentaires actuelles émettent déjà environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Elles exploitent aussi 70 % de l'eau douce disponible et mobilisent 40 % des sols, où elles font un usage immodéré des engrais, ce qui perturbe les cycles de l'azote et du phosphore, tout en causant une grande partie de la pollution des rivières et des côtes.

En 2019, la commission EAT-Lancet en alimentation, santé publique et environnement, une équipe de 37 nutritionnistes, écologues et autres experts de 16 pays, a appelé dans un rapport à d'importants changements dans le système alimentaire, prenant en compte à la fois la nutrition et l'environnement. La commission a proposé un régime alimentaire de référence, de type « flexitarien », qui donne la part belle à la consommation de végétaux, complétés occasionnellement de petites quantités de viande ou de poisson. Ce rapport a suscité un très vif intérêt pour les régimes alimentaires durables, mais aussi un certain nombre de critiques quant à leur accessibilité pour les populations pauvres. Certains chercheurs tentent désormais de définir et de tester des régimes alimentaires qui soient soutenables pour l'environnement local, et qui ne compromettent ni la qualité alimentaire ni les moyens de subsistance des communautés autochtones. « Il nous faut progresser vers des régimes à empreinte écologique considérablement réduite, sinon nous assisterons dans quelques décennies à l'effondrement mondial de la biodiversité, des terres utilisables, et de tout le reste », affirme Sam Myers, le directeur de l'Alliance pour la

Le photographe Peter Menzel a demandé en 2010 à des individus issus de 80 pays de présenter leur menu quotidien. Cette jeune femme, au Québec, a opté pour une alimentation végétarienne. Son menu du jour lui apporte 1 900 kilocalories.

What I Eat © Peter Menzel / Cosmos

santé planétaire (Planetary Health Alliance), une organisation cofondée à Boston, dans le Massachusetts, par la revue scientifique médicale *The Lancet* et la fondation Rockefeller pour étudier les effets des changements environnementaux sur la santé humaine.

LES GAZ À EFFET DE SERRE AU MENU

La production alimentaire engendre, en effet, de telles émissions de gaz à effet de serre qu'au rythme actuel, même si les nations réduisaient à zéro toutes leurs émissions non alimentaires, elles ne seraient pas en mesure de limiter la hausse des températures à 1,5 °C, l'objectif climatique de l'accord de Paris. Une grande partie des émissions du système alimentaire – 30 à 50 %, selon certaines estimations – provient de l'alimentation du bétail, car les animaux convertissent très inefficacement le fourrage en nourriture. En 2014, David Tilman, un écologue de l'université du Minnesota, et Michael Clark, un chercheur spécialisé dans les systèmes alimentaires de l'université d'Oxford, ont estimé qu'entre 2010 et 2050 l'urbanisation et la croissance démographique entraîneront une augmentation de 80 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'alimentation. Toutefois, si chacun mangeait davantage de végétaux et si l'on arrêtait les émissions de tous les autres secteurs, l'humanité aurait une chance sur deux d'atteindre l'objectif de moins de 1,5 °C d'élévation de la température moyenne mondiale. Et si, parallèlement au régime alimentaire, les systèmes de production alimentaire dans leur ensemble s'amélioraient – par exemple en réduisant le gâchis –, il y aurait deux chances sur trois d'atteindre cet objectif.

Sur le plateau tibétain, cet éleveur de yaks nomade présente les plats constituant ses repas du matin au coucher. Ce jour-là, ils lui apportent 5 600 kilocalories.

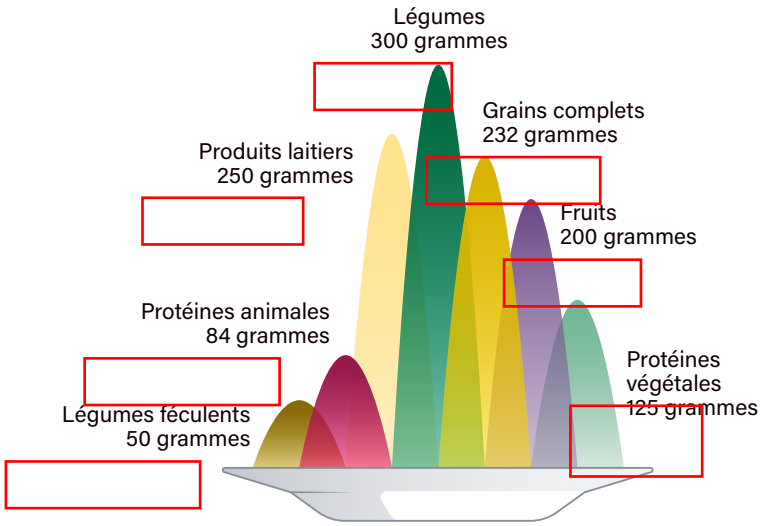
Ces estimations ne sont pas bien accueillies dans l'industrie de la viande. Ainsi, quand en 2015 le département de l'Agriculture des États-Unis a entrepris comme tous les cinq ans de réviser ses recommandations alimentaires, il a brièvement envisagé, devant les arguments des scientifiques, de prendre en compte la protection de l'environnement. Toutefois, très vite, l'idée fut rejetée, sous l'influence de l'industrie, avance Timothy Griffin, un spécialiste des systèmes alimentaires de l'université Tufts, à Boston. Les préoccupations des chercheurs ont cependant été remarquées : « Notre plus grande réussite est d'avoir attiré l'attention sur la question de la durabilité », se réjouit Timothy Griffin. La commission EAT-Lancet, dont l'un des fondateurs est l'organisation caritative britannique Wellcome, a contribué à renforcer le dossier. Des nutritionnistes ont passé en revue la littérature scientifique, puis élaboré un régime alimentaire de base, équilibré, composé d'aliments complets. S'agissant des émissions de gaz à effet de serre, de la perte de biodiversité, de l'utilisation d'eau douce, des sols, de l'azote et du phosphore, l'équipe a ensuite fixé à ce régime des limites choisies pour éviter de rendre la planète inhabitable par l'humanité.

C'est ainsi que les membres de la commission en sont arrivés à élaborer un menu varié, donnant une large part aux aliments d'origine végétale (*voir l'encadré pages 70-71*). La quantité de viande rouge envisagée pour un régime à 2 500 calories par jour, convenant à une personne de poids moyen, est de 100 grammes par semaine, ce qui correspond à une seule portion hebdomadaire. Cela représente moins d'un quart de ce que consomme un Américain moyen. Les sucres, les graisses et les boissons gazeuses ainsi que les aliments ultratransformés comme les plats surgelés et les viandes reconstituées sont pour la plupart exclus.

What I Eat © Peter Menzel / Cosmos

UN RÉGIME SAIN, DURABLE, MAIS COÛTEUX

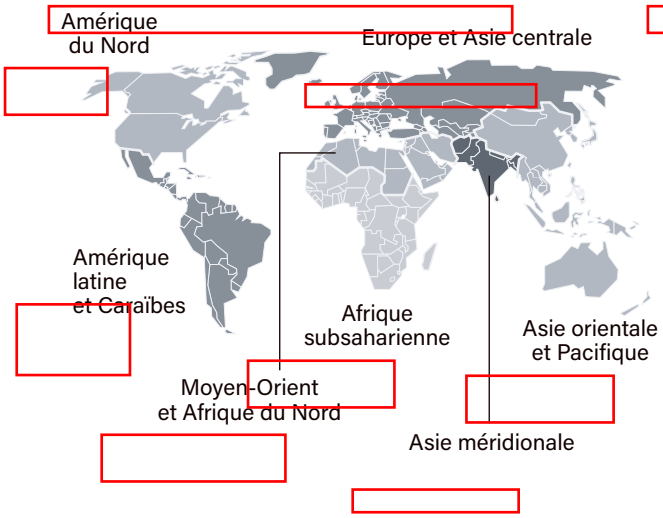
Une équipe de nutritionnistes a élaboré un régime alimentaire dit de « santé planétaire », censé être équilibré et durable, puis comparé sa composition avec celle des régimes alimentaires de différentes régions du monde. Des recherches indépendantes montrent que dans de nombreuses parties pauvres du monde, ce régime serait cependant trop coûteux pour les individus.



RÉGIME DE RÉFÉRENCE DIT DE « SANTÉ PLANÉTAIRE », EN GRAMMES PAR JOUR

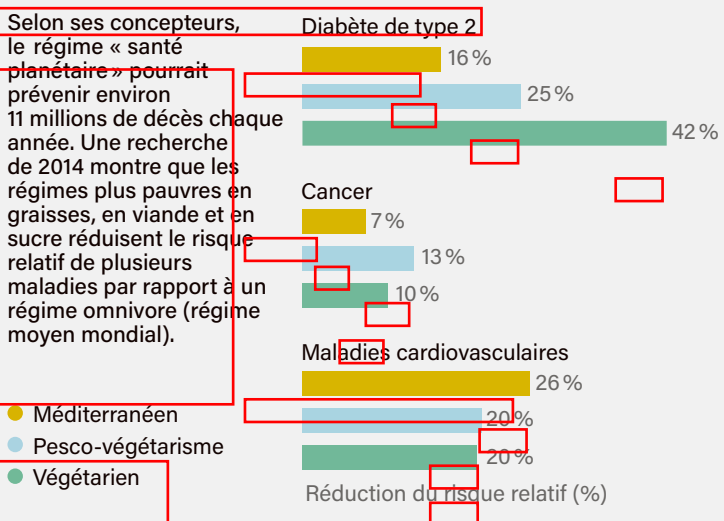
PRISES ALIMENTAIRES EN 2016

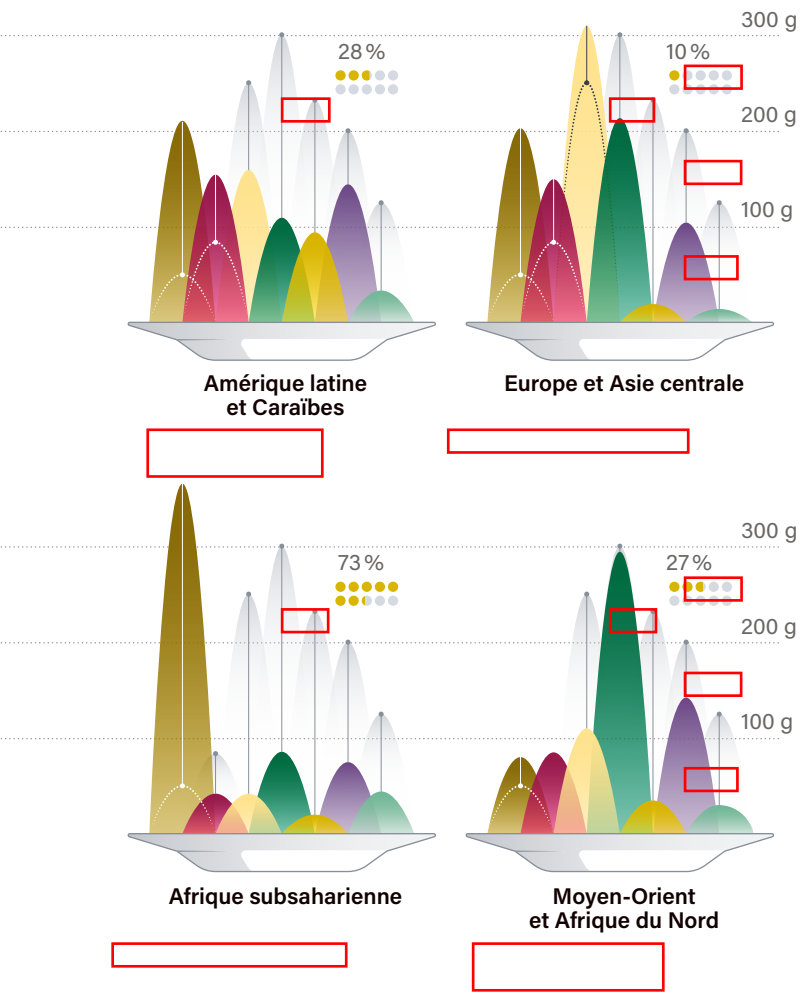
RÉGIONS DU MONDE CONSIDÉRÉES



RÉDUCTION DES RISQUES POUR LA SANTÉ

Selon ses concepteurs, le régime « santé planétaire » pourrait prévenir environ 11 millions de décès chaque année. Une recherche de 2014 montre que les régimes plus pauvres en graisses, en viande et en sucre réduisent le risque relatif de plusieurs maladies par rapport à un régime omnivore (régime moyen mondial).

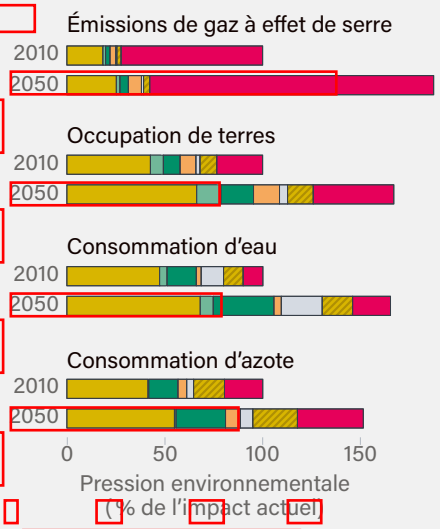




COÛTS ENVIRONNEMENTAUX

Entre 2010 et 2050, la croissance estimée de la démographie et des revenus pourrait entraîner une augmentation de 50 à 90 % des pressions environnementales exercées par les systèmes alimentaires, notamment sur le climat et les réserves d'eau douce.

- Cultures de base
- Protéines végétales
- Fruits et légumes
- Huiles végétales
- Sucres
- Autres cultures
- Produits animaux



Selon la commission, l'adoption de ce type de diète préviendrait environ 11 millions de décès prématurés chaque année. « Nourrir correctement 10 milliards d'humains, sans détruire davantage les écosystèmes, est possible », affirme Tim Lang, un chercheur en politique alimentaire à l'université de Londres, coauteur du rapport de la commission EAT-Lancet. « Que cela leur plaise ou non, les partisans de la ligne dure de l'industrie bovine et laitière sont désormais sur leurs gardes. Le changement est à présent inévitable. »

De nombreux chercheurs sont convaincus que le régime alimentaire EAT-Lancet serait très bénéfique dans les pays riches, dont les habitants consomment en moyenne 2,6 fois plus de viande que ceux des pays pauvres ; mais d'autres se demandent si son adoption conduira à une alimentation satisfaisante pour les populations défavorisées. Ty Beal, un chercheur de l'Alliance mondiale pour l'amélioration de la nutrition, en poste à Washington, a établi dans une étude non publiée que le régime EAT-Lancet ne fournit que 78 % de la prise recommandée de zinc, 86 % des besoins en calcium des adultes de plus de 25 ans et seulement 55 % des besoins en fer des femmes en âge de procréer. Par-delà ces critiques, les travaux de la commission EAT-Lancet ont placé la préoccupation environnementale au premier plan : « Avant l'étude EAT-Lancet, je ne pense pas que les responsables politiques auraient eu à l'esprit que la durabilité doive être intégrée dans les échanges mondiaux sur le changement de régime alimentaire », estime Anne Elise Stratton, spécialiste des systèmes alimentaires de l'université du Michigan, à Ann Arbor.

COMMENT CONVAINCRE ?

Reste que le régime EAT-Lancet n'est pas un modèle unique convenant à tous, souligne Marco Springmann, spécialiste en nutrition à l'université d'Oxford, qui a fait partie de l'équipe centrale de modélisateurs de la commission. Depuis le rapport, la communauté internationale des chercheurs en santé publique travaille à adapter la diète au monde entier, qu'il s'agisse de nourrir un adulte en surpoids ou un enfant sous-alimenté. Les chercheurs en nutrition savent que la plupart des gens ne suivent pas les recommandations alimentaires qu'on leur préconise. C'est pourquoi certains d'entre eux se consacrent avant tout aux moyens de les convaincre d'adopter une alimentation équilibrée et durable. Patricia Eustachio Colombo, spécialiste de la nutrition à l'institut Karolinska de Stockholm, et ses collègues s'attachent à introduire prudemment dans les écoles suédoises un régime alimentaire calculé pour être soutenable. Leurs travaux s'appuient pour cela sur une mouvance née dans les pays scandinaves, le « nouveau régime nordique », qui

© Nature, Kerri Smith (conception)/Jasiek Krzysztofiak (réalisation) ; Sources : W. Willett et al., Lancet, vol. 393, pp. 447-492, 2019 (consommation) ; K. Hirvonen et al., Lancet Glob. Health, vol. 8, pp. e59-e66, 2020 (coûts) ; M. Springmann et al., Nature, vol. 562, pp. 519-525, 2018 (coûts environnementaux) ; D. Tilman et M. Clark, Nature, vol. 515, pp. 518-522, 2014 (risques pour la santé)

Cette étudiante en mode et design à Ispahan, en Iran, a disposé devant elle les préparations composant son alimentation du jour. Elles lui apportent 2 400 kilocalories.

encourage la consommation d'aliments traditionnels et durables, comme les légumes de saison et la viande d'animaux élevés en plein air. Les chercheurs ont analysé les repas scolaires servis dans une école élémentaire fréquentée par 2 000 élèves. Leur algorithme a suggéré des moyens de les rendre plus nutritifs et plus respectueux de l'environnement, par exemple en réduisant la quantité de viande dans un ragoût traditionnel et en ajoutant davantage de haricots et de légumes. Parents et enfants étaient informés qu'une initiative visant à améliorer les menus était en cours, mais sans autre précision, explique Patricia Eustachio Colombo. La plupart des enfants n'ont rien remarqué et le gaspillage alimentaire n'a pas non plus augmenté. La même expérience est désormais reconduite avec 2800 enfants. « Les repas scolaires sont une occasion précieuse de favoriser une alimentation plus durable, puisque nous conservons le plus souvent à l'âge adulte les habitudes alimentaires développées pendant l'enfance », pointe la spécialiste de la nutrition. Le régime testé est très différent du cadre fixé par la commission EAT-Lancet, précise-t-elle. Il est moins cher et comprend davantage de féculents, notamment des pommes de terre, un aliment de base en Suède. Il est aussi plus nutritif et culturellement plus acceptable. « Cela montre l'importance d'adapter la diète EAT-Lancet à la culture d'un pays, voire à ses régions », ajoute-t-elle.

De l'autre côté de l'Atlantique, certains universitaires et restaurateurs testent le régime auprès des populations défavorisées. À Baltimore, dans le Maryland, un traiteur et un restaurateur, tous deux contraints de fermer leur établissement pendant la pandémie de Covid-19, ont recueilli des dons et se sont alliés pour fournir des repas gratuits conçus d'après le régime EAT-Lancet à des familles vivant au sein de « déserts alimentaires », c'est-à-dire des zones où l'accès à une alimentation nutritive et abordable est limité. L'un des repas était composé de galettes de saumon accompagnées d'un mélange de légumes de saison, de couscous israélien et d'une sauce au pesto.

DES OBSTACLES CULTURELS ET ÉCONOMIQUES

Des chercheurs de l'école de médecine de l'université Johns-Hopkins, à Baltimore, après avoir interrogé 500 personnes ayant testé ces repas, ont constaté que 93 % des 242 personnes ayant répondu les avaient appréciés. L'inconvénient ? Les repas subventionnés grâce à des dons revenaient à 10 dollars, soit cinq fois le montant actuellement accordé par le programme américain de coupons alimentaires. « Il est évident qu'un changement radical des régimes alimentaires pourrait avoir un impact positif sur l'environnement, mais il y a des obstacles culturels et économiques à cela », commente Timothy Griffin.

Cet article est une traduction de **What humanity should eat to stay healthy and save the planet**, publié le 21 décembre 2021 sur Nature.com

What I Eat © Peter Menzel / Cosmos

L'un des obstacles que rencontrent les chercheurs pour mettre au point des régimes alimentaires destinés aux pays à revenu faible ou intermédiaire est la détermination des populations dans leur façon de s'alimenter. « Cela reste assez énigmatique pour moi, confie ainsi Purnima Menon, de l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires de New Delhi, car les dernières données sur l'alimentation des Indiens datent déjà d'une dizaine d'années. » Obtenir ces informations est crucial en Inde, car le pays se classe 101e sur 116 pays dans l'indice mondial de la faim et compte le plus grand nombre au monde d'enfants trop maigres pour leur taille. À partir des données disponibles sur l'alimentation, sur l'eau, sur les émissions de gaz à effet de serre, sur l'utilisation des terres et celle du phosphore et de l'azote, Abhishek Chaudhary, spécialiste des systèmes alimentaires à l'institut indien de technologie Kanpur, qui a aussi fait partie de l'équipe EAT-Lancet, et son collègue Vaibhav Krishna, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, ont utilisé un programme informatique pour concevoir des régimes adaptés à chacun des États indiens. Ce programme a suggéré des régimes répondant aux besoins nutritionnels, réduisant de 35 % les émissions liées à l'alimentation et ne sollicitant pas les autres ressources environnementales. Toutefois, pour cultiver la quantité de nourriture requise, il faudrait avoir des rendements plus élevés ou disposer de 35 % de terres en plus – ce qui n'est pas possible dans le pays surpeuplé qu'est l'Inde. Le coût des aliments serait aussi 50 % plus élevé. Les régimes alimentaires sains et durables sont chers ici aussi.

Lora Iannotti souligne que les repas diversifiés composés de noix, de poisson, d'œufs, de produits laitiers et d'autres aliments qui sont conseillés dépassent largement les moyens de millions de personnes. Ainsi, en 2011 – l'année pour laquelle les données les plus récentes sur les prix alimentaires sont disponibles –, un repas conforme aux recommandations de la commission EAT-Lancet aurait coûté en moyenne 2,84 dollars par jour, soit 1,6 fois plus que le coût d'un repas nutritif de base.

D'autres problèmes pratiques se posent : par exemple, les restrictions sur la viande que s'imposent les individus. Dans les lieux où de nombreuses personnes ont des carences alimentaires et où les aliments du régime EAT-Lancet sont indisponibles, les produits d'origine animale seraient une source cruciale de nutriments facilement biodisponibles. Toutefois, les systèmes agricoles répandus dans les pays à faible revenu sont à petite échelle : on y combine la culture et l'élevage de quelques animaux domestiques, que l'on garde pour les vendre en cas de nécessité familiale, explique Jimmy Smith, directeur général de l'Institut international de recherche sur le bétail, à Nairobi. « Les producteurs de lait des hauts plateaux éthiopiens ont trois ou quatre animaux dans leur arrière-cour, qui ont tous des noms ; ce sont des membres de la famille », témoigne-t-il.

Nourrir correctement 10 milliards d'individus est possible sans détruire plus avant les écosystèmes

Aujourd'hui, les chercheurs des régions à revenu faible ou intermédiaire sont plus préoccupés par les niveaux de production alimentaire que par la préservation de l'environnement, souligne Purnima Menon. La FAO a mis sur pied un comité chargé de prolonger les travaux de la commission EAT-Lancet. La nouvelle étude devra être plus mondiale et inclure parmi les sujets traités la sécurité alimentaire et la durabilité du secteur de l'élevage, précise Lora Iannotti, qui fait partie du comité. Elle sera publiée en 2024. « À la FAO, on n'a pas l'impression que les faits soient examinés de façon assez équilibrée et complète dans le rapport EAT-Lancet, explique-t-elle. Il nous faut aller plus loin et pour cela nous procurer des données en provenance du monde entier. »

Selon les chercheurs, la meilleure méthode pour trouver des régimes alimentaires durables adaptés aux pays pauvres exige de collaborer avec les communautés et les paysans concernés, comme ce fut le cas à Kilifi. Michael Clark, qui a dressé la carte des régimes alimentaires mondiaux à l'aide de projections basées sur des modèles, pense que les spécialistes des systèmes alimentaires doivent maintenant trouver des solutions locales afin d'amener les gens à mieux manger. « Tous ceux qui travaillent dans le secteur de l'alimentation durable doivent aller s'enquérir dans les communautés de ce que les gens aiment manger, dit-il, puis, sur cette base, élaborer des régimes susceptibles de leur plaire ! » ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Chaudhary et V. Krishna, **Region-specific nutritious, environmentally friendly, and affordable diets in India,** *One Earth*, 2021

K. Hirvonen *et al.*, **Affordability of the EAT-Lancet reference diet : A global analysis,** *The Lancet Global Health*, 2020.

M. A. Clark *et al.*, **Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets,** *Science*, 2020.

Collaboration GBD, **Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017 : A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017,** 2019.

W. Willett *et al.*, **Food in the Anthropocene : The EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems,** *The Lancet*, 2019.

L. Iannotti *et al.*, **Eggs in early complementary feeding and child growth : A randomized controlled trial,** *Pediatrics*, 2017.

L'ESSENTIEL

> En 1729, un jeune professeur d'hydrographie, Pierre Bouguer, proposa une méthode fiable pour mesurer l'intensité des sources de lumière.

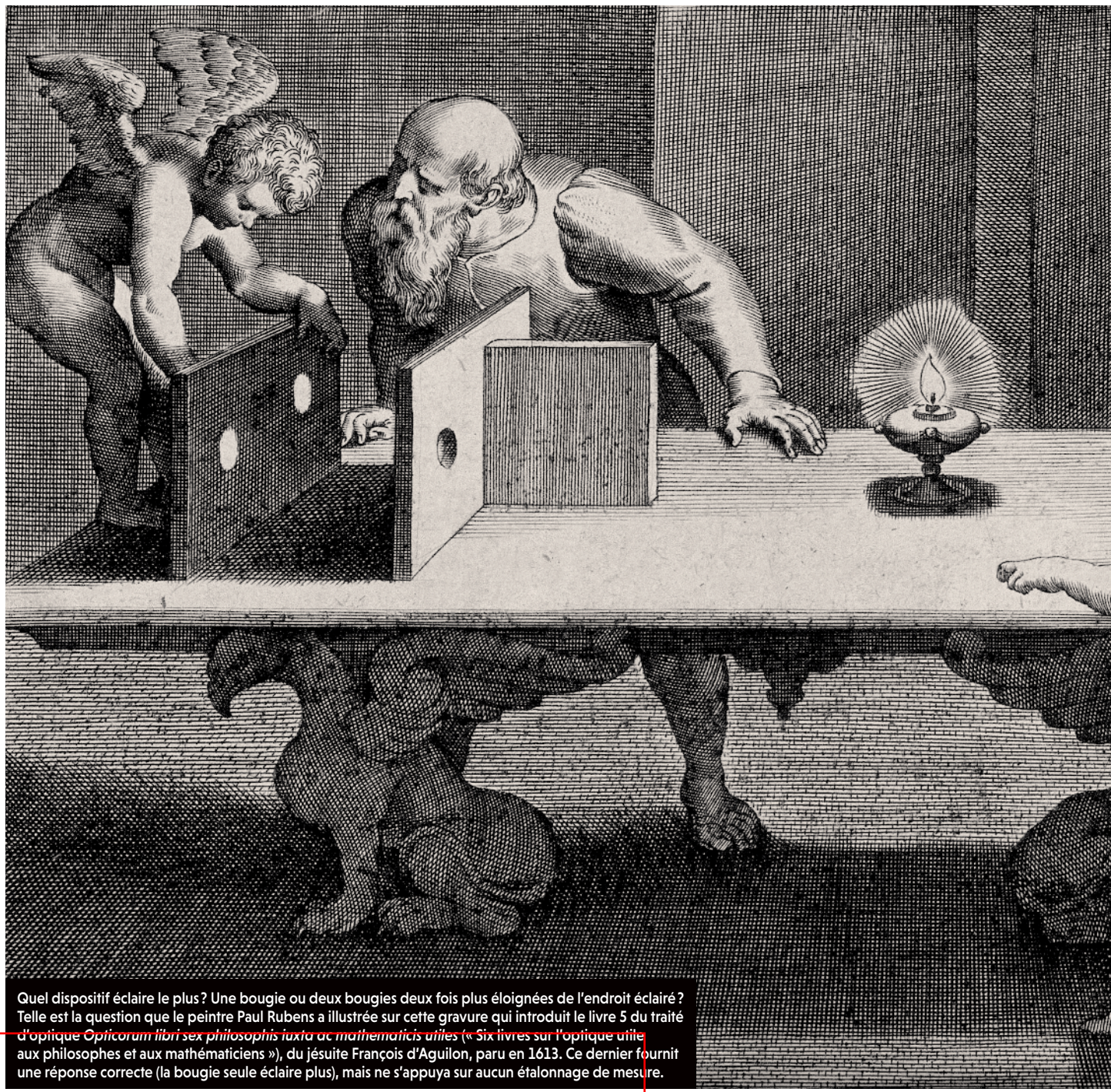
> Jusqu'alors, les tentatives dépendaient toutes de la vision de l'opérateur et n'étaient pas satisfaisantes.

> Son approche, qui transpose le problème en une mesure de distances et qui ne fait plus appel à l'œil humain que comme égalisateur de luminosités, a marqué la naissance de la photométrie.

> La candela, l'unité actuelle de mesure de l'intensité lumineuse, s'appuie toujours sur ses travaux.

L'AUTEUR

LIONEL SIMONOT
physicien, maître de conférences de l'université de Poitiers à l'Institut P'



Quel dispositif éclaire le plus ? Une bougie ou deux bougies deux fois plus éloignées de l'endroit éclairé ? Telle est la question que le peintre Paul Rubens a illustrée sur cette gravure qui introduit le livre 5 du traité d'optique *Opticorum libri sex philosophis iuxta ac mathematicis utiles* (« Six livres sur l'optique utile aux philosophes et aux mathématiciens »), du jésuite François d'Aguilon, paru en 1613. Ce dernier fournit une réponse correcte (la bougie seule éclaire plus), mais ne s'appuya sur aucun étalonnage de mesure.

© Well/BGT/Alamy Banque d'Images

L'illumination de Pierre Bouguer

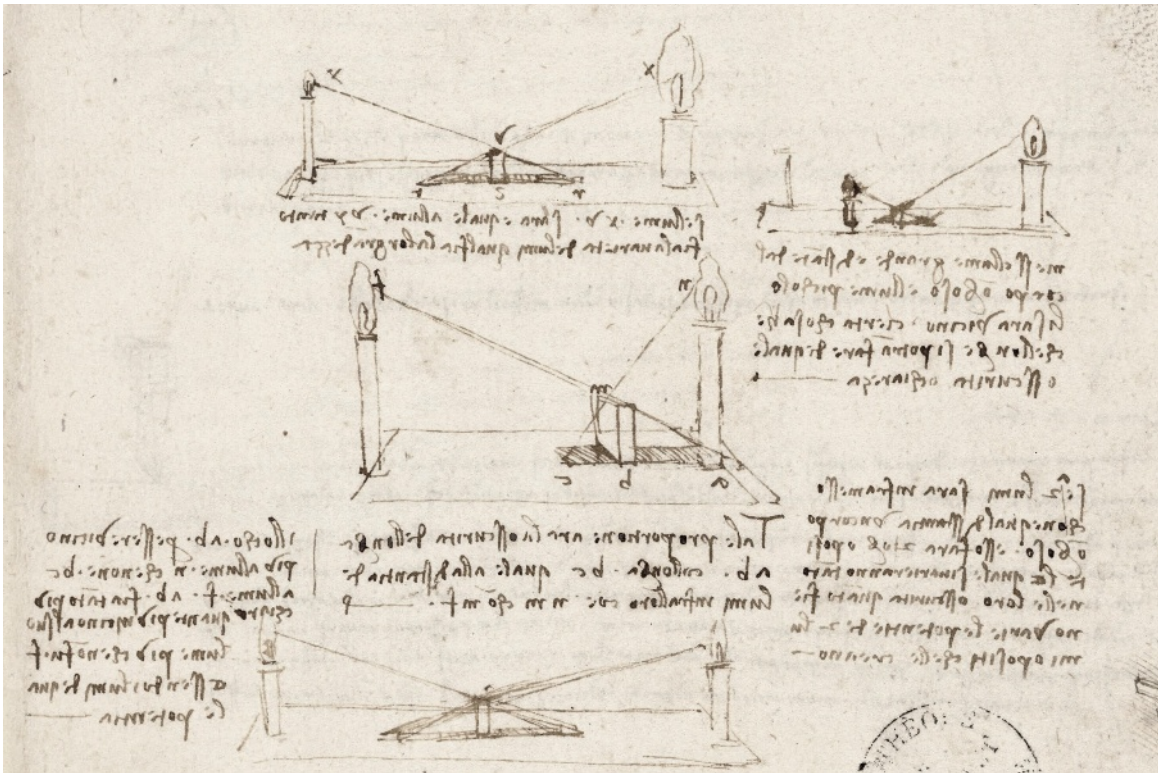
L'art de mesurer la lumière, si utile aujourd'hui pour évaluer les performances de nos dispositifs d'éclairage ou pour classer les objets célestes, a vu le jour dans un court *Essai d'optique* paru en 1729, qui a marqué son temps et bien au-delà...

Pourquoi fait-il froid en hiver et chaud en été? C'est la question à laquelle tente de répondre en 1721 Jean-Jacques Dortous de Mairan, savant reconnu et membre de l'Académie royale des sciences. Parmi les causes envisagées, la différence d'exposition de notre planète au Soleil en fonction des saisons. Mais comment quantifier cette différence de manière rigoureuse? C'est un jeune homme d'une vingtaine d'années, Pierre Bouguer, qui relève le défi quelques années plus tard.

À première vue, son intérêt pour cette question est inattendu. En 1714, alors qu'il n'était âgé que de 16 ans, Bouguer avait succédé à son père comme professeur royal d'hydrographie dans sa ville natale du Croisic, près de Nantes, et, depuis lors, il formait les pilotes et capitaines de la marine marchande. Mais Bouguer avait une bonne raison de feuilleter le volume de l'*Histoire de l'Académie royale des sciences de l'année 1721*, paru en 1723, et de s'attarder sur le mémoire où Dortous de Mairan traitait du sujet. En effet, cette même année 1721, l'Académie des sciences lui avait demandé de comparer plusieurs méthodes de jaugeage des navires (mesure de leur capacité de chargement) en les éprouvant en conditions réelles. Ce dont Bouguer s'était acquitté. Or non seulement Dortous de Mairan était l'auteur d'une des méthodes, mais en tant que membre de l'Académie, il avait lu le rapport de Bouguer à ses congénères (rapport qui privilégiait sa méthode) et en avait publié un compte rendu dans le même volume. Un autre aspect avait pu attirer Bouguer: en tant qu'hydrographe, tout ce qui avait un lien avec la navigation l'intéressait, notamment l'orientation en mer par l'observation des étoiles et, par extension, l'optique en général.

La question de Dortous de Mairan relève de ce domaine, mais elle n'est pas simple! En effet, comment mesurer la lumière de manière fiable avec pour seul photodétecteur l'œil de l'opérateur? Certes, le système visuel humain est capable de détecter des luminosités allant de la quasi-obscurité jusqu'à l'éblouissement, performance encore inégalée par les photodétecteurs actuels. Mais l'œil humain ne peut faire une mesure absolue de la lumière reçue, d'autant qu'il s'adapte à la luminosité ambiante. Une seconde difficulté est d'obtenir une échelle linéaire en intensité lumineuse et non en lumière perçue, autrement dit un étalonnage qui rende la mesure indépendante de la vision de l'opérateur.

C'est pourtant bien une réponse pertinente qu'a apportée le jeune Bouguer. Son *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, paru en 1729, est passionnant à plus d'un titre. D'une part, il expose la première solution satisfaisante pour mesurer la lumière et, d'autre part, il constitue une rupture par rapport aux approches précédentes et marque ainsi la naissance de la photométrie, l'art de mesurer la lumière. Ce mémoire, dont une transposition en langage actuel vient de paraître, est une étape importante de l'histoire des idées scientifiques qui mérite que l'on



Si Léonard de Vinci n'a pas assez approfondi ses expérimentations pour proposer un véritable protocole de mesure de la lumière, il a néanmoins observé qu'en modifiant la distance d'une des sources, il était possible d'égaliser la « force » des ombres, comme il l'explique ici dans un de ses carnets.

s'y attarde. Le principe de mesure que Bouguer a défini a perduré pas moins de deux cents ans, avant que les détecteurs photoélectriques ne le supplantent au début du XX^e siècle. Quant aux lois de photométrie qu'il a établies, elles sont toujours utilisées...

ORDONNER LES ÉTOILES

Il est difficile de savoir quand et dans quelles circonstances est apparue la nécessité de mesurer, ou du moins d'ordonner, des intensités lumineuses. Mais il est probable que cela ait été dans le but de cataloguer et classifier les étoiles. L'*Almageste*, de l'astronome grec Claude Ptolémée (II^e siècle) référence 1 026 étoiles et, pour la première fois, les classe en six degrés de luminosité appelés « magnitudes ». On imagine que cette échelle se fonde sur l'heure à laquelle les étoiles deviennent visibles dans un ciel de plus en plus crépusculaire.

Au fil des siècles, les astronomes n'ont guère remis en cause cette classification. Certains ont proposé des tentatives de subdivision des magnitudes et, à partir du XVII^e siècle, les observations à la lunette astronomique ont permis d'atteindre des magnitudes supérieures (correspondant à des luminosités plus faibles). Toutefois, l'objectif de cette classification était davantage d'aider à l'identification des étoiles qu'à mesurer leur intensité lumineuse.

Au tournant du XVIII^e siècle, cependant, deux personnes se sont penchées sur le problème et ont chacune proposé une ou plusieurs méthodes pour effectuer cette mesure. En 1698, dans son ouvrage *Cosmotheoros*, le physicien et astronome néerlandais Christiaan Huygens a suggéré de comparer quantitativement la luminosité du Soleil et celle de Sirius en observant les deux astres à travers un long tube équipé d'un diaphragme réglable. Les luminosités (on parlerait aujourd'hui de « luminance », grandeur photométrique désignant la densité de flux lumineux par unité d'étendue géométrique du faisceau lumineux) varient en valeurs inverses du diamètre d'ouverture du diaphragme. L'idée est d'ajuster ce dernier pour égaliser les éclairements que produisent les deux étoiles. Bouguer critique fortement cette méthode dans son *Essai*: le principe est correct (le ratio des intensités est égal à celui des aires des diaphragmes), mais la comparaison des luminosités émises par les deux astres à plusieurs heures d'intervalle n'est pas fiable.

Les deux méthodes que le père François Marie, moine capucin de Paris, a décrites deux ans plus tard ne trouvent pas plus grâce aux yeux de Bouguer. S'inspirant d'une part des instruments d'optique et, d'autre part, du baromètre, du thermomètre et de l'hygromètre, inventés ou largement améliorés au XVII^e siècle, il a conceptualisé deux sortes de « lucimètres », fondés sur des principes assez proches. Le premier consiste à faire passer la lumière à travers un empilement de plaques de verre identiques; le nombre de plaques de verre nécessaire pour éteindre complètement la lumière détermine les degrés de celle-ci. Le second repose lui aussi sur l'atténuation de la

À LIRE

Retrouvez l'Essai d'optique sur la gradation de la lumière, de Pierre Bouguer (Light Zoom Lumière, 2022) dans une nouvelle version introduite, commentée et transposée en langage actuel, proposée par Lionel Simonot.

© Bibliothèque de l'Institut de France, Manuscrits de Leonard de Vinci, Ms 2174 (manuscrit C folio 22 recto, circa 1490-1492)

lumière, mais par réflexions successives sur des miroirs identiques.

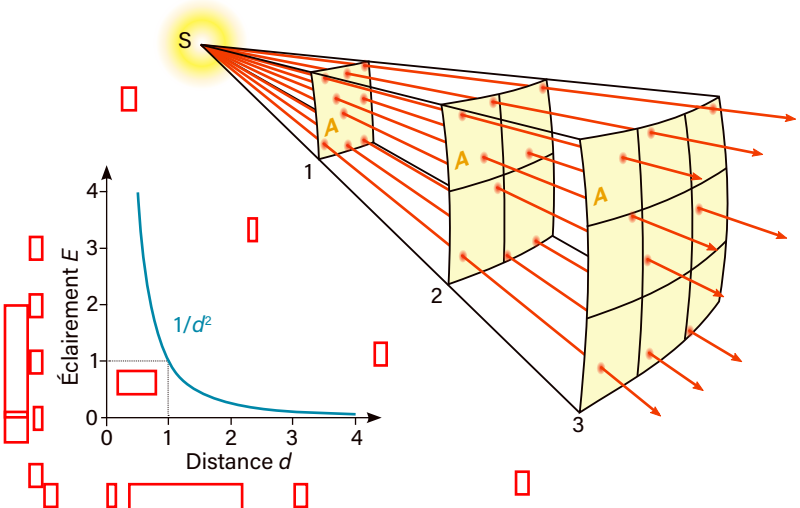
Quand Bouguer a écrit son *Essai*, il ne connaissait pas les travaux du capucin. C'est bien plus tard, à la fin de sa vie, après nombre d'autres aventures (*voir l'encadré page 79*), qu'il a critiqué ces dispositifs, dans un *Traité d'optique* publié de manière posthume en 1760. Bouguer a reproché principalement deux choses au moine. D'une part, sa mesure dépendait de la vue de l'opérateur – une faiblesse dont le capucin était lui-même déjà bien conscient. D'autre part, Bouguer avait lui aussi étudié l'atténuation de la lumière à travers un empilement de plaques de verre et l'échelle des degrés qu'il avait obtenue ne correspondait pas à celle du religieux. En fait, tout porte à croire que le capucin a juste présenté des concepts et ne les a pas expérimentés. Il n'a d'ailleurs donné aucun conseil pratique pour la fabrication de ses lucimètres.

Ainsi, quand le jeune Bouguer se penche sur la question soulevée par Dortous de Mairan, le champ est plutôt libre. Pour répondre au savant, il choisit une approche cartésienne: diviser en problèmes élémentaires plus simples et agencer de manière logique les différentes étapes de la démonstration. L'Académicien avait formulé sa question ainsi: comment quantifier la différence de lumière reçue entre les deux positions extrêmes du Soleil à l'aplomb – celles des solstices d'été et d'hiver – ou entre deux hauteurs du Soleil le même jour qui correspondraient à celles de l'astre aux solstices? Bouguer subdivise sa démonstration en deux étapes.

Dans la première, il ramène la mesure de l'éclairement à une autre plus aisée en rappelant une loi « reconnue de tous les lecteurs qui sont initiés dans l'optique » : l'éclairement en un point varie inversement au carré de la distance de la source lumineuse à ce point. Cette loi, dite « des carrés inverses » (*voir l'encadré ci-dessous*) associe une variation de luminosité à une simple mesure de distance. Dans la seconde, il règle le problème de la détection en remarquant que l'œil humain est un bon

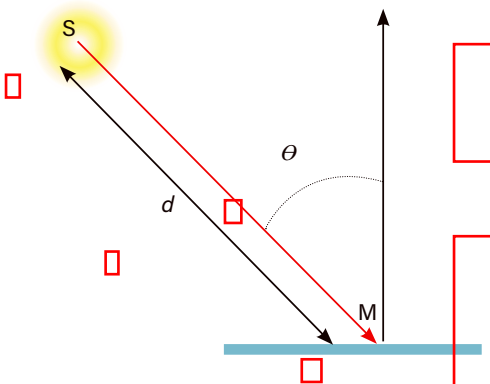
LA LOI DES CARRÉS INVERSES

Dès le début de son *Essai d'optique*, Pierre Bouguer explicite la loi de décroissance de l'éclairement avec le carré de la distance à la source lumineuse. Cette loi a été établie en 1604 par l'astronome allemand Johannes Kepler dans son livre *Astronomiae pars Optica*. Pour la comprendre, il faut bien saisir qu'un éclairement est une densité de flux lumineux par unité de surface. Or si dans un cône partant de la source ponctuelle S, un flux de lumière traverse une surface élémentaire A à une distance $d = 1$, la surface traversée a une aire quatre fois plus grande à la distance $d = 2$, et neuf fois plus grande à la distance $d = 3$ *(ci-contre à droite)*. La densité de flux sur la surface A diminue bien avec l'inverse de la distance au carré.



Pour compléter la relation entre l'éclairement E(M) en un point M et l'intensité I_0 d'une source de lumière, il faut prendre en compte l'orientation de la lumière par rapport à la normale au détecteur. En 1760, dans son *Photometria*, le mathématicien suisse Johann Heinrich Lambert a établi que la variation se fait selon une loi en cosinus. L'expression générale s'écrit :

$$E(\mathrm{M}) = \frac{I_0}{d^2}\cos\theta$$



Cette relation n'est strictement valable que si la source est ponctuelle, et en pratique pour des distances d beaucoup plus grandes que la taille de la source. Pour cette raison, cette approximation est dite « en champ lointain ». Les calculs en champ proche sont plus fastidieux puisqu'ils nécessitent de découper la source étendue en surfaces d'aire élémentaire, de déterminer la contribution à l'éclairement de chacune d'elles, et enfin de sommer ces éclairements élémentaires. Cette loi dite « de Bouguer » devrait donc plutôt s'appeler « loi de Kepler-Bouguer-Lambert »... En revanche, la loi dite « de Beer-Lambert » devrait s'appeler « loi de Bouguer » : Bouguer fut le premier à présenter – dans son *Essai d'optique* – des mesures d'atténuation de la lumière à travers des couches d'eau ou des plaques de verre et à montrer que cette atténuation suit une loi exponentielle décroissante en fonction de l'épaisseur du milieu traversé. Mais c'est une autre histoire !

Crédit du schéma en 3D : © Borb/Wikimedia commons (CC BY-SA 3.0)

La bougie est restée l'unité d'intensité lumineuse jusqu'en 1954

comparateur de luminosités. En particulier, il est capable de détecter si les éclairements entre deux zones adjacentes illuminées simultanément par deux sources de lumière sont égaux. C'est cette propriété que Bouguer utilise pour effectuer sa mesure: une fois assurée l'égalisation des éclairements des deux sources à comparer, le rapport des intensités lumineuses est égal au rapport des distances au carré.

Reste encore à mettre en pratique ce principe de mesure. Pour établir l'égalisation des éclairements, il est nécessaire d'utiliser une source auxiliaire déplaçable. Par exemple, une bougie. Celle-ci deviendra l'unité d'intensité lumineuse et le restera jusqu'en 1954, où la candela prendra sa place dans le système international des unités.

Cependant, mesurer l'intensité lumineuse du Soleil aux solstices d'hiver et d'été pose d'autres problèmes pratiques. Il faut attendre six mois entre les deux mesures et, surtout, la luminosité du Soleil est bien trop importante par rapport à celle des chandelles dont dispose le savant. Astucieusement, Bouguer considère la pleine Lune plutôt que le Soleil. À des hauteurs identiques, la lumière des deux astres traverse bien la même épaisseur d'atmosphère et diminue par conséquent de la même proportion.

UNE NUIT DE PLEINE LUNE

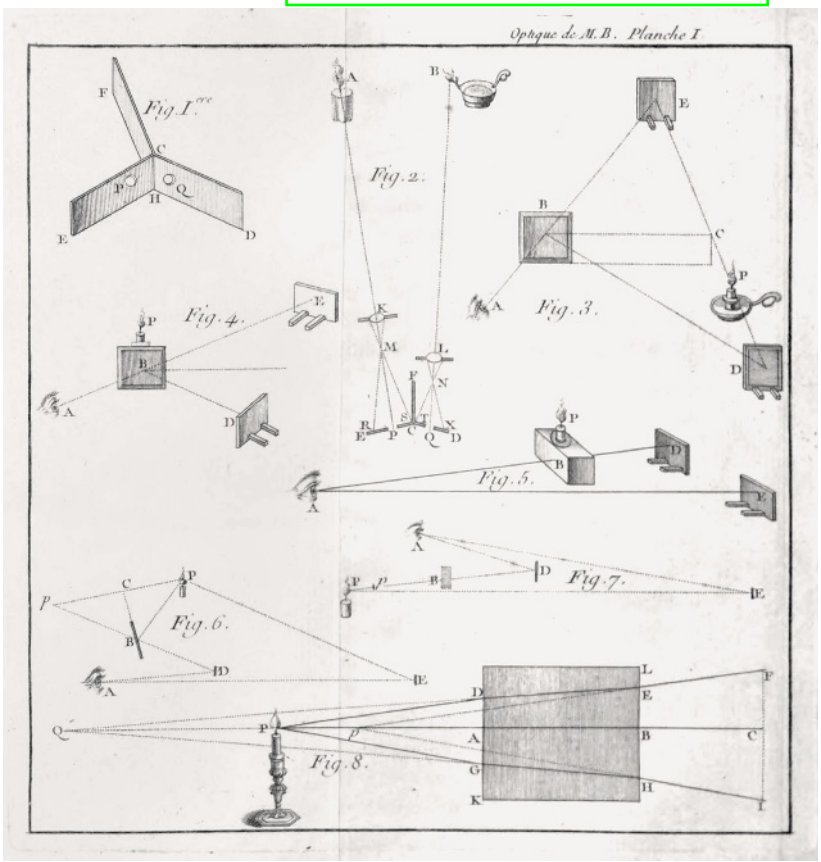
La mesure consiste à comparer la lumière de la pleine Lune à celle de quatre chandelles. L'opération a lieu lors de deux nuits consécutives: le 23 novembre 1725 vers 10 heures et demie du soir et la nuit suivante vers 3 heures du matin pour des hauteurs de pleine Lune correspondant à celles du Soleil aux solstices d'hiver et d'été au Croisic. Résultat: la première intensité lumineuse mesurée correspond à environ deux tiers de la seconde. Bouguer a donc réussi à quantifier la différence d'éclairement entre les solstices d'hiver et d'été, et a ainsi confirmé que cette différence suffit à expliquer, au moins en partie, pourquoi il fait plus froid en hiver. L'Académie, satisfaite, publie la présentation de ses résultats en 1726.

Dans la préface de son *Essai*, Bouguer envisage des pistes d'applications pour sa méthode. Étonnamment, il met l'accent sur une idée en lien avec la peinture, plus précisément avec la perspective aérienne, « cette gradation des teintes et demi-teintes, qui est cause que les parties d'un tableau semblent fuir ou avancer ».

L'OMBRE DE LÉONARD

Cette idée fait écho à la pratique des peintres de la Renaissance, et en particulier de Léonard de Vinci. À cette époque, la perspective et la peinture à l'huile ont permis de traduire les volumes et les reliefs avec un réalisme rarement atteint jusqu'alors. Vinci a bénéficié de cette révolution technique et a porté la maîtrise de la construction des ombres et des lumières jusqu'à l'incarner. Il n'est donc pas surprenant de trouver, dans un de ses fameux codex, quelques schémas rudimentaires décrivant le principe de comparaison des ombres créées par deux sources (*voir la figure page 76*).

Bouguer connaissait-il ses travaux? Peu probable. En revanche, peut-être avait-il lu des ouvrages se référant au traité d'optique qu'un savant jésuite d'Anvers, François d'Aguilon, a publié en 1613 et dans lequel un autre peintre, Paul Rubens, semble illustrer le fonctionnement



Dans son *Traité d'optique*, publié de manière posthume en 1760, Pierre Bouguer présente divers systèmes de mesure photométrique. Il y critique également des dispositifs antérieurs aux siens, dont la mesure dépend de la vue de l'opérateur.

© Bibliothèque de l'université de Turin

PIERRE BOUGUER, DE LA MER À LA TERRE

Pierre Bouguer naît au Croisic en 1698. À seize ans seulement, il remplace son père, décédé, comme professeur d'hydrographie. La majorité de ses travaux portent sur la navigation : formes des bateaux, manœuvres, mesures pour s'orienter en mer… Scientifique reconnu, il est élu membre de l'Académie royale des sciences en 1731 en tant que géomètre. La vie de Bouguer bascule en 1735 lorsque l'Académie le choisit pour participer à l'expédition géodésique de Louis Godin et Charles de La Condamine au Pérou. La théorie de la gravitation universelle de Newton prévoyant un aplatissement du globe terrestre aux pôles, il s'agit de déterminer la « figure de la Terre », c'est-à-dire l'écart par rapport à la sphère parfaite, et de mesurer le degré méridien à l'équateur. Difficulté des mesures, rudesse du climat et du relief, enjeux géopolitiques, querelles entre savants… Pierre Bouguer retourne en France après plus de huit ans en Amérique latine. Rentré quelques mois plus tard, La Condamine, refusant de lui laisser tous les honneurs de l'expédition, l'attaque sur sa rigueur scientifique. S'ensuit une longue et pénible polémique entre les deux hommes qui ne s'achève qu'à la mort de Bouguer, en 1758.

Une statue de Pierre Bouguer surplombe la mer dans le port du Croisic, sa ville natale.

d'un photomètre (*voir la gravure page 74*). L'expérience représentée consiste à comparer la tache lumineuse formée par une lampe à une flamme et celle formée par une lampe à deux flammes placée à une distance double. D'Aguilon établit que la première est la plus fortement éclairée. Mais le savant ne formalise pas cette décroissance de l'éclairement avec la distance. Il est donc probable que personne, en dehors des deux génies dessinés par Rubens, n'ait jamais utilisé ce prototype de photomètre…

Quoi qu'il en soit, les liens entre photométrie et peinture se sont révélés plus minces que Bouguer ne l'espérait. En 1857, dans un article intitulé « L'optique et la peinture », le physicien Jules Jamin, s'adressant aux peintres français dits « réalistes », a démontré, photomètre en main, l'impossibilité de conserver sur une toile la même dynamique de luminosités que dans la réalité. Pour reproduire en peinture la perspective et les effets de profondeur d'un paysage, la seule solution est de donner l'illusion de la réalité par la maîtrise des clairs-obscurs. Le livre *De la loi du contraste simultané*, du chimiste Michel-Eugène Chevreul, publié en 1839, a eu bien davantage d'influence sur les peintres français que les ouvrages de photométrie.

LE TEMPS DES PHOTOMÈTRES

En revanche, l'*Essai* de Bouguer a suscité l'engouement des savants pour la photométrie, et de nombreux dispositifs ont vu le jour. À la fin du XVIIIe siècle, notamment, le physicien américain Benjamin Thomson, comte de Rumford, a proposé un photomètre fondé (comme sur les schémas de Vinci !) sur la comparaison des ombres et non des éclairements. L'œil se fatigue moins et l'observateur a plus de temps pour ajuster la luminosité. Au XIXe siècle, on a utilisé des photomètres pour quantifier les performances des brûleurs des nouvelles lampes à gaz. En raison de sa simplicité et de son faible coût, celui du chimiste allemand Robert Bunsen a connu un certain succès. Le composant principal était une feuille blanche qu'une tache d'huile rendait translucide en son centre. On plaçait la feuille entre les deux sources de lumière à comparer et l'égalisation des éclairements se produisait lorsque la tache de graisse était aussi lumineuse que le reste du papier et devenait donc invisible. Il a fallu en revanche attendre le milieu du XIXe siècle pour qu'un photomètre à égalisation visuelle soit proposé pour évaluer la luminosité des étoiles : celui de l'astrophysicien allemand Johann Zöllner, qui présentait une lampe au kérosène comme étoile artificielle et un dispositif polarisant pour moduler son intensité.

Des variantes sont aussi apparues. Les photomètres thermométriques, visant à s'affranchir de la subjectivité des mesures en évaluant la chaleur émise, n'ont pas connu un grand succès. La photométrie stellaire a aussi tenté de s'emparer de la photographie, mais l'étalonnage était particulièrement délicat. Au XXe siècle, enfin, les détecteurs photoélectriques se sont imposés pour toutes les mesures photométriques. La lumière détectée étant transformée en courant électrique, une fois l'étalonnage fait, la comparaison visuelle n'était plus nécessaire – un atout considérable. Restait cependant une difficulté : comment relier la puissance d'un rayonnement lumineux détectée par une photodiode au flux lumineux perçu par l'œil humain ? L'artifice, proposé dès la fin des années 1920 et toujours utilisé aujourd'hui, a consisté à définir la sensibilité spectrale d'un « observateur standard ». Il s'agit d'une courbe spectrale obtenue à l'aide d'expériences psychovisuelles fondées sur le principe d'égalisation des éclairements… celui-là même défini par Bouguer. La candela du XXIe siècle, qui rattache l'intensité lumineuse perçue à une intensité énergétique, lui doit donc beaucoup ! ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Bouguer, **Essai d'optique sur la gradation de la lumière**, 1729, éd. L. Simonot, Light Zoom Lumière, 2021.

L. Simonot, **Premières mesures photométriques : de Léonard de Vinci à Pierre Bouguer**, Photoniques, 2020.

D. Fauque, **Pierre Bouguer et l'« affaire du jaugeage », 1721-1726**, *Revue d'histoire des sciences*, 2010.

D. Fauque, **Du bon usage de l'éloge : cas de celui de Pierre Bouguer**, *Revue d'histoire des sciences*, 2001.

J. E. Morère, **La photométrie : les sources de l'*Essai d'optique sur la gradation de la lumière* de Pierre Bouguer, 1729**, *Revue d'histoire des sciences*, 1965.

© Stucki/Wikimedia commons (CC BY-SA 2.5)

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*

DES CRYPTO-MONNAIES SOBRES EN ÉNERGIE ?

Un problème de récréation mathématique met en lumière la difficulté à concevoir des cryptomonnaies justes, économes et écologiques.

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)

Un débat fait rage depuis une dizaine d'années concernant les méthodes de sécurisation des cryptomonnaies anonymes. Il concerne le système Bitcoin et ses concurrents principaux Ethereum, Cardano ou Solana et a pris une importance de plus en plus grande avec la montée de leurs cours. De la conclusion qu'on tirera de ce débat dépendra sans doute l'avenir des cryptomonnaies et plus généralement des cryptoactifs dont l'impact écologique s'accroît gravement aujourd'hui.

Le problème posé peut s'expliquer en considérant un jeu assez simple qui dégage le problème de son contexte un peu confus. Ce jeu permet à chacun de comparer les deux solutions principales et peut-être d'en imaginer de nouvelles. Voici ce « jeu du mécène et des enveloppes anonymes ».

DISTRIBUER AU MIEUX DE L'ARGENT

Imaginez qu'un riche mécène vous confie une certaine somme S, par exemple 1 million d'euros, en vous demandant de la distribuer. Vous êtes chargé d'organiser une sorte de jeu pour répartir le plus équitablement possible la somme S entre les gens qui acceptent de recevoir une part de cet argent. Vous leur demandez de manifester leur souhait en vous faisant parvenir à un lieu fixé une enveloppe avec une adresse, dans laquelle vous mettrez ce que vous leur attribuez avant de renvoyer l'enveloppe à l'adresse inscrite.

Si vous collectez N enveloppes, la méthode qui vient immédiatement à l'esprit consiste à mettre S/N euros dans chacune des enveloppes et à les renvoyer.

La « méthode S/N » n'est pas parfaite, car les personnes ayant plusieurs domiciles pourraient mettre plusieurs enveloppes à leur nom avec des adresses différentes, ce qui vous empêcherait de savoir que l'argent ira à la même personne. Il y a pire : le mécène vous a demandé de concevoir une méthode qui n'oblige pas ceux qui veulent recevoir une part de S à transmettre leur adresse véritable. Vous acceptez donc que des joueurs se regroupent sur une même adresse et vous soumettent des enveloppes avec des adresses anonymes du type « joueur 237 au 11, rue Dupont, à Paris ».

Vous comprenez bien que si vous utilisez la méthode S/N, chaque joueur sera tenté d'envoyer une multitude d'enveloppes dont les contenus lui seront destinés. Il utilisera plusieurs adresses, ou une seule adresse A en prenant le rôle du joueur 1, du joueur 2, etc. de l'adresse A. Si vous utilisez la méthode S/N, vous allez donc recevoir des milliers

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

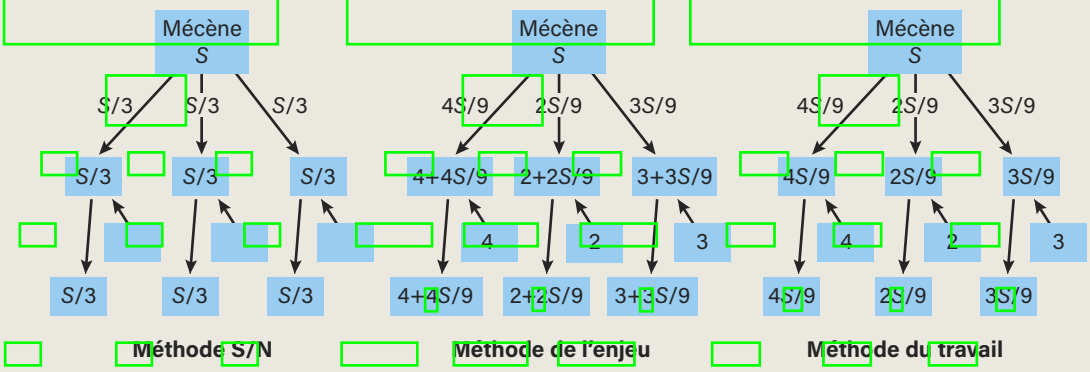
LE JEU DU MÉCÈNE ET DES ENVELOPPES

Un mécène veut distribuer une somme S le plus équitablement possible. Il reçoit des enveloppes dans lesquelles il répartit S. La question est de savoir quelle est la meilleure méthode.

• Méthode S/N
S'il reçoit N enveloppes, il dépose dans chacune S/N et les renvoie. Ceux qui ont envoyé plusieurs enveloppes sont favorisés.

• Méthode de l'enjeu
Le mécène exige que chacun risque un enjeu en mettant une somme dans son enveloppe. Il renvoie les enveloppes en y laissant l'enjeu, et en y ajoutant une partie de S proportionnelle à l'enjeu trouvé dans l'enveloppe.

• Méthode du travail
Il demande qu'on joigne à l'enveloppe un ruban difficile à fabriquer. Il détruit le ruban, et place dans l'enveloppe une partie de S proportionnelle à la longueur du ruban trouvé dans l'enveloppe.



d'enveloppes, peut-être des millions, et les plus malins seront ceux qui auront envoyé le plus grand nombre d'enveloppes pour eux-mêmes et s'approprieront une grande part de la somme S. Les plus gros tricheurs seront favorisés aux dépens de ceux, honnêtes, qui n'auront envoyé qu'une enveloppe. Comment éviter cela?

Ce n'est pas facile. S'il n'y a aucune façon parfaite pour résoudre le problème, plusieurs méthodes organisent la distribution en rendant inopérante la tricherie de l'envoi de plusieurs enveloppes et en assurant une certaine équité entre les joueurs. Nous verrons plus loin que cette petite énigme mathématique est la transposition du problème du consensus dans les blockchains anonymes de cryptomonnaies (des bases de données détenant toutes les informations sur l'état de tous les comptes).

SOLUTION 1. LA MÉTHODE DE L'ENJEU

Vous demandez à chaque joueur de joindre à son enveloppe une certaine somme d'argent. Vous distribuez alors la somme S dans les enveloppes en proportion des sommes qui ont été jointes et en laissant la somme envoyée qui est donc retournée à l'envoyeur. En clair: si l'enveloppe E_i contient la somme s_i, vous laissez s_i dans l'enveloppe, vous y ajoutez $S \times s_i/(s_1+...+s_n)$, puis vous renvoyez l'enveloppe.

On vérifie immédiatement que cela constitue bien une distribution totale de S. Ceux qui ont manifesté un soutien plus fort au jeu et donc une bonne confiance en son organisateur en mettant des sommes importantes dans leur enveloppe sont favorisés proportionnellement au risque pris. Ce n'est pas absurde car justement vous voulez favoriser ceux qui soutiennent le jeu et ont confiance en vous. Le point important est que cette méthode rend inopérant l'envoi de plusieurs enveloppes par une même personne car si quelqu'un envoie, par exemple, deux enveloppes avec 10 euros dans chacune, le gain qu'il en tirera sera le même qu'avec une enveloppe contenant 20 euros. Le gain d'un joueur est proportionnel à ce qu'il est prêt à engager – la somme des s_i de ses enveloppes – et ne dépend pas du nombre d'enveloppes qu'il envoie. Utiliser plusieurs enveloppes plutôt qu'une ne fait rien gagner. Nous nommerons cette organisation de la distribution «La méthode de l'enjeu» car la somme mise par un joueur dans une enveloppe est comme un enjeu qu'il risque.

SOLUTION 2. LA MÉTHODE DU TRAVAIL

Une seconde idée évite aussi que des tricheurs envoient plusieurs enveloppes. L'organisateur de la distribution demande à chaque joueur de réaliser un ruban de dentelle brodée d'un type précisé. Le joueur en fabrique la longueur qu'il souhaite, ce qui lui prend du temps, il met le bout de ruban dans l'enveloppe qu'il envoie à l'organisateur du jeu.

Certains joueurs enverront 10 centimètres de ruban, d'autres joueurs 1 mètre, etc. La distribution de la somme se fera alors en proportion de la longueur des rubans de chaque enveloppe et les rubans seront détruits. Si l'enveloppe E_i contient un ruban de longueur L_i,

© Pour la Science

après l'avoir vidée de son ruban et avoir détruit le ruban, l'organisateur y placera la somme $S \times L_i/(L_1+...+L_n)$ et la renverra. Comme précédemment, la méthode rend inopérant l'envoi de plusieurs enveloppes par un même joueur car, en envoyant deux enveloppes avec 10 centimètres de ruban, il gagnera autant qu'en envoyant une seule enveloppe avec 20 centimètres de ruban. Il y a un travail à faire pour réaliser le ruban en dentelle, c'est une mesure de confiance que le joueur accorde à l'organisateur de la distribution et un engagement de sa part. Le travail de fabrication du ruban qu'il met dans son enveloppe détermine le gain d'un joueur. Plus un joueur travaille à fabriquer un long ruban plus il reçoit une part importante de S. On nommera cette méthode « La méthode du travail ».

DES MÉTHODES ÉQUIVALENTES ?

On peut imaginer d'autres méthodes mais ce n'est pas facile et aucune n'est parfaite, aucune ne permet d'assurer que chaque joueur gagne la même partie de S. Dans un premier temps, comparons « La méthode de l'enjeu » et « La méthode du travail ».

Posons-nous deux questions. Est-ce que les deux méthodes sont équivalentes l'une à l'autre, ou l'une est-elle meilleure ? Que se passe-t-il si la distribution de la somme S est répétée toutes les semaines pendant une longue période ?

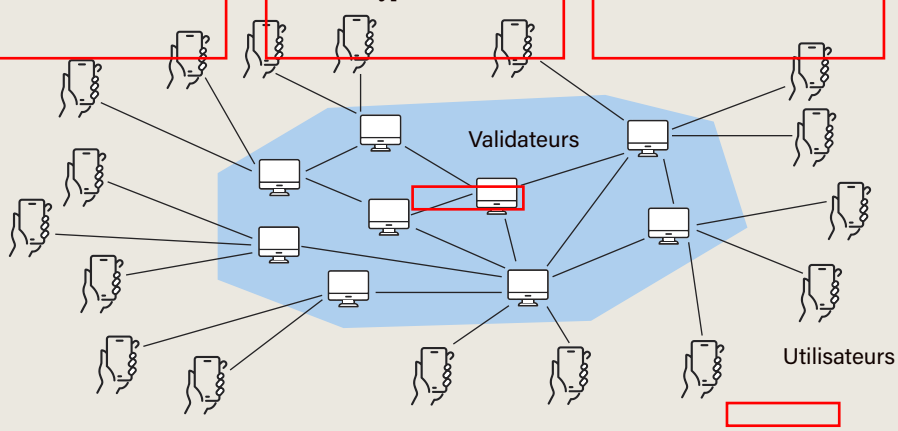
La méthode de l'enjeu favorise ceux qui sont assez riches pour joindre à leur enveloppe une somme importante. Mais la méthode du travail souffre du même inconvénient, car si vous êtes riches, vous paierez d'autres personnes pour faire de grandes longueurs de ruban qui vous permettront de gagner plus. Sur ce plan, les deux méthodes se valent, elles favorisent ceux qui ont les moyens de s'engager et prennent le risque de le faire.

Quand la distribution des S euros est opérée chaque semaine par la méthode de l'enjeu, il se produit quelques petits changements au cours du temps. Une fois persuadés que le jeu est sérieux, un nombre plus grand de joueurs y participent, certains joueurs empruntent de l'argent pour pouvoir s'engager plus et gagner plus. L'évolution principale est sans doute une augmentation globale des sommes engagées de semaine en semaine.

Si on suppose que la distribution est opérée par la méthode du travail, il se produit un phénomène très différent, mais assez simple à analyser, car il s'agit d'un problème élémentaire d'économie. Certains joueurs développent des moyens pour produire le plus de rubans de

2 LE FONCTIONNEMENT DES CRYPTOMONNAIES ANONYMES

Une cryptomonnaie s'appuie sur un réseau de validateurs indépendants qui s'occupent, chacun, de garder le registre des comptes (dénommé « fichier blockchain ») et de le mettre à jour en accord avec les autres validateurs. Pour que la monnaie puisse circuler et qu'elle soit bien sécurisée, il faut qu'il y ait assez de validateurs. On rémunère donc les validateurs pour ce travail. Ce paiement s'opère souvent en créant de nouvelles unités de la cryptomonnaie, et en demandant aux utilisateurs du réseau (ceux qui détiennent des comptes) de payer des commissions quand ils font des opérations sur leurs comptes. Ce sont ces nouvelles unités et ces commissions qui constituent la somme S que le réseau distribue aux validateurs. Sur le schéma, les validateurs sont au centre du réseau, les utilisateurs à l'extérieur. La distribution de S se fait périodiquement, par exemple toutes les 10 minutes pour le réseau Bitcoin. Lorsque les validateurs sont bien identifiés, la distribution de S est facile, par exemple par la méthode S/N : chacun des N validateurs reçoit S/N. Lorsque les validateurs sont anonymes une tricherie est à craindre : que chaque validateur apparaisse plusieurs fois, voire des centaines de fois car l'anonymat rend impossible de savoir si des validateurs apparemment différents le sont réellement. C'est ce qu'on dénomme « une attaque Sybil ». Pour éviter l'injustice que créent de telles attaques, il faut trouver autre méthode que celle de S/N. Une idée est souvent utilisée : on demande à chaque validateur V_i d'engager une somme s_i, puis de la mettre sous séquestre. La distribution se fait en proportion des s_i. La méthode se dénomme « la preuve d'enjeu ». Satoshi Nakamoto (c'est un pseudonyme), l'inventeur des cryptomonnaies, a proposé la méthode de la « preuve de travail », qui consiste à demander à chaque validateur V_i de réaliser un travail de calcul en choisissant et en mettant en œuvre une puissance de calcul c_i plus ou moins importante. La distribution se fait en proportion des c_i. La preuve de travail et la preuve d'enjeu résolvent le problème des attaques Sybil, mais elles produisent des effets économiques très différents.



© Pour la Science

dentelle possible. Ils finissent par concevoir des machines spécialisées pour faire efficacement les rubans demandés et réussissent à diminuer les coûts de fabrication. À la longue, certains d'entre eux disposent de multiples machines performantes et fabriquent des longueurs énormes de rubans pourtant destinés à être détruits. Ils deviennent ce que nous appellerons des « industriels des rubans ». Ils sont concurrents et les joueurs qui fabriquent les rubans à la main voient leur part de l'attribution diminuer de semaine en semaine et même devenir négligeable, car les industriels des rubans s'emparent de la presque totalité de S à chaque distribution.

Comparée à la preuve d'enjeu, la preuve de travail semble catastrophique

La concurrence entre les industriels des rubans engendre un problème de rentabilité. Un industriel ne gagne une somme G, lors de la distribution hebdomadaire de la somme S, que s'il dépense pour la fabrication des rubans une somme qui se rapproche de G. En effet, si la fabrication pour gagner G coûte sensiblement moins que G, des concurrents attirés par le bon rendement de ce type d'investissement développent leurs outils et entrent sur le marché, ce qui fait baisser le rendement. À la longue, le rendement de la fabrication des rubans diminue et par exemple conduit les industriels du ruban à dépenser 80% (peut-être plus) de la somme G qu'ils gagnent chaque semaine en coût de production des rubans. Globalement, à cause de la compétition, les industriels des rubans qui se sont presque emparés de la totalité de la somme S distribuée chaque semaine dépensent par exemple 80% de S chaque semaine pour produire les rubans qui leur rapportent donc collectivement 20% de S. Le rendement sous cette hypothèse est de 25% (20% comparé à 80%), ce qui est suffisant pour que l'activité se poursuive. L'équilibre évoluera peut-être et la concurrence suscitera des progrès dans la fabrication des rubans, mais le rendement des investissements des industriels des rubans sera toujours assez réduit, par exemple 25% ou moins si la concurrence devient plus féroce.

La situation est en réalité devenue absurde: au lieu de distribuer chaque semaine la somme S, si on prend en compte les dépenses pour produire les rubans, chaque semaine c'est seulement 20% de S qui est réellement distribuée par le mécène. Non seulement il y a concentration de la distribution sur les industriels du ruban, mais en plus 80% de la somme S ou plus est en quelque sorte utilisée en pure perte pour fabriquer des rubans aussitôt détruits.

Comparée à la méthode de l'enjeu, la méthode du travail semble catastrophique et le mécène qui donne la somme S chaque semaine ne sera certainement pas satisfait qu'on distribue S par la méthode du travail. Les deux méthodes évitent la tricherie des enveloppes multiples, aucune des deux méthodes n'est parfaite, mais la méthode de l'enjeu est clairement meilleure.

VARIANTE À ENJEU CONFISQUÉ

On peut aussi imaginer que les sommes s_i ne sont pas rendues, mais confisquées. Un problème assez délicat en résulte. Chacun essaiera d'engager le plus d'argent possible en mettant une somme s_i élevée dans son enveloppe. Mais si le total de l'argent engagé par les joueurs est supérieur à S, alors la somme redistribuée sera inférieure à ce que les joueurs auront engagé et sacrifié; puisque l'argent redistribué à chacun est proportionnel à son enjeu, chaque joueur sera perdant. Le jeu deviendrait un peu fou car chacun serait tenté d'engager le plus possible en espérant que les autres engagent le moins possible. Une sorte de piège serait tendu aux joueurs qui risqueraient tous de perdre de

3 LES ATTAQUES SYBIL

Lorsqu'un système de communication accepte l'anonymat des utilisateurs, cela engendre des difficultés imprévues. Cela est apparu en informatique à l'occasion de la mise au point des réseaux pair-à-pair, c'est-à-dire sans administrateur central. La possibilité pour une même personne d'utiliser plusieurs pseudonymes différents lui procure des avantages assimilables à une tricherie, comme dans le cas de la distribution par la méthode S/N quand un joueur envoie plusieurs enveloppes. Sur les réseaux sociaux ou les forums, c'est par exemple un moyen de faire croire que plusieurs personnes soutiennent une même idée alors qu'en réalité il n'y en a qu'une. Ce procédé est nommé « attaque Sybil ». Ce nom provient du titre du livre *Sybil*, publié en 1973 par Flora Schreiber, qui raconte la vie de Shirley Mason, une femme qui aurait été atteinte d'un trouble dissociatif de l'identité, c'est-à-dire de personnalités multiples. Le nom d'« attaque Sybil » fut introduit en informatique par John Douceur en 2002. Le risque d'attaques Sybil a contraint Satoshi Nakamoto à introduire les preuves de travail dans la cryptomonnaie Bitcoin, bien que la solution des preuves d'enjeu introduite quelques années plus tard soit maintenant reconnue comme bien meilleure, ce que le jeu du mécène rend évident.

l'argent au profit de l'organisateur. Cette méthode pourrait être intéressante pour l'organisateur, mais pour notre problème où le mécène veut vraiment donner S, cette option amusante n'a pas d'intérêt.

La variante selon laquelle l'argent des enjeux est donné à une organisation caritative est sympathique. Elle revient à forcer les joueurs à abandonner une part de leurs gains en la donnant à l'organisation caritative, mais ce n'est pas le but du mécène.

Rien ne semble sensiblement mieux que les deux premières méthodes décrites, mais si des lecteurs en imaginent d'autres plus satisfaisantes, ils peuvent me le signaler.

VARIANTES PROBABILISTES

La méthode de l'enjeu et la méthode du travail ont chacune une variante probabiliste essentiellement équivalente. Elles vont nous approcher encore un peu plus du problème réel des cryptomonnaies. Si la distribution du mécène se déroule un très grand nombre de fois, par exemple toutes les heures pendant des années, au lieu de distribuer la somme S en la fractionnant, l'organisateur du jeu pourrait choisir de la distribuer à l'une des enveloppes, qui serait désignée au hasard en utilisant la distribution de probabilité fixée par les sommes distribuées avec la méthode de l'enjeu, ou la méthode du travail.

Si par exemple la méthode de l'enjeu fixe que l'enveloppe 1 reçoit 1/4 de S et que l'enveloppe 2 reçoit 3/4 de S (il n'y a que deux enveloppes pour l'exemple), la « méthode de l'enjeu probabiliste » choisit de donner S à l'enveloppe 1 avec une probabilité de 1/4 et de donner S à l'enveloppe 2 avec une probabilité de 3/4. L'organisateur jette par exemple un dé tétraédrique et donne S à l'enveloppe 1 si le 1 sort et donne la somme S à l'enveloppe 2 si le 2, le 3 ou le 4 sort. La répétition de l'utilisation du tirage au sort produit à la longue une attribution de 1/4 de l'argent distribué au premier joueur, et de 3/4 au second.

Sur le long terme, « la méthode probabiliste de l'enjeu » est donc équivalente à la méthode de l'enjeu. De même, « la méthode probabiliste du travail » est équivalente à la méthode du travail. Les raisonnements proposés plus haut pour les comparer s'appliquent et conduisent à la conclusion que la méthode probabiliste du travail engendre une situation absurde de gâchis économique.

LE CAS DES CRYPTOMONNAIES

Nous sommes maintenant arrivés au problème posé par les blockchains anonymes des cryptomonnaies. Le réseau qui fait fonctionner une cryptomonnaie (Bitcoin, Ethereum, Cardano, Solana, etc.) distribue périodiquement une certaine somme d'argent pour qu'il y ait des joueurs, qui ici sont les validateurs du réseau, c'est-à-dire ceux qui le font fonctionner. Le réseau les rémunère parce que le réseau existe grâce à eux et que plus ils sont nombreux plus le réseau est décentralisé, ce qui est jugé souhaitable.

La rémunération provient soit de nouvelles unités monétaires que le réseau crée, soit des commissions que les utilisateurs paient quand ils utilisent le réseau et qui naturellement vont à ceux qui le font fonctionner. C'est la logique du modèle économique de tels réseaux décentralisés : certains paient pour l'utiliser, d'autres sont

© Marco Krohn/Wikimedia Commons

4 LES DIFFICULTÉS DE L'ANONYMAT

Il existe de bonnes raisons pour promouvoir des systèmes qui reposent sur l'anonymat : protéger la vie privée, éviter que des données sensibles soient exploitées par des personnes malintentionnées.
Cela peut cependant engendrer des inconvénients.
Par exemple, permettre aux validateurs d'une cryptomonnaie de rester anonymes oblige à un système de rémunération délicat alors que le problème est simple quand les validateurs sont bien identifiés, et que personne ne peut se cacher sous plusieurs pseudonymes. Cet anonymat, s'il concerne aussi les utilisateurs (ceux qui souhaitent détenir des comptes), ouvre la porte à une multitude de trafics et d'escroqueries. Les plus graves sont les rançongiciels : le pirate installe un programme sur le réseau d'une entreprise, d'une administration ou d'un hôpital ; le programme chiffre les fichiers du système informatique et fait apparaît un message indiquant qu'il faut payer une rançon à un utilisateur anonyme d'un réseau de cryptomonnaie pour retrouver les données perdues.
La preuve de travail introduit d'autres escroqueries, dont le *cryptojacking*. Dans un système fonctionnant avec la preuve de travail, la quantité de calculs qu'on est capable de faire fixe combien on gagne. Le pirate informatique installe un programme sur des ordinateurs qui ne sont pas à lui et leur demande de faire ces calculs rémunérateurs. Des milliers d'ordinateurs ont ainsi été mis au service de pirates.
Cela conduit parfois à des dysfonctionnements graves des systèmes informatiques concernés et à des vols importants d'électricité.
La preuve d'enjeu n'ouvre pas la possibilité de ce type de vol lié à la preuve de travail.

rémunérés parce qu'ils le font fonctionner. Dans le cas du Bitcoin, 6,25 bitcoins sont créés toutes les dix minutes environ et attribués à l'un des validateurs du réseau, qui reçoit aussi des commissions provenant des utilisateurs du réseau.

Lorsque les validateurs sont anonymes, ce qui est le cas pour les cryptomonnaies mentionnées, le problème de l'attribution est alors exactement celui du «jeu du mécène et des enveloppes», car les validateurs peuvent apparaître sous plusieurs identités comme les joueurs qui envoient plusieurs enveloppes. En sécurité informatique, la tricherie consistant à apparaître sous plusieurs identités est nommée «une attaque Sybil» (*voir l'encadré 3*). Ces attaques ne sont possibles que sur les réseaux anonymes, et c'est bien parce que les cryptomonnaies mentionnées sont conçues avec des validateurs anonymes qu'il y a un problème. Si les validateurs étaient clairement identifiés, il serait possible de les rémunérer par la méthode S/N ou sa variante probabiliste. Pour les blockchains où les validateurs sont clairement identifiés, le problème de la distribution de l'incitation n'existe pas ou est très simple. Précisons que l'identification des validateurs n'oblige pas à l'identification des utilisateurs, qui peuvent rester anonymes même quand les validateurs sont connus.

Concevoir la méthode de rétribution des validateurs du réseau d'une cryptomonnaie dont les validateurs sont anonymes revient donc exactement à résoudre le «jeu du mécène et des enveloppes» décrit plus haut.

La méthode de l'enjeu a été proposée et elle est utilisée par de nombreux réseaux de cryptomonnaies avec des variations dans le détail. Elle prend le nom de «preuve d'enjeu» ou de «preuve de participation». La méthode du travail prend le nom de «preuve de travail». Les méthodes adoptées sont le plus souvent les versions probabilistes.

Le travail à faire dans le cas de la preuve de travail n'est pas, bien sûr, la fabrication de rubans en dentelle ensuite détruits. Le travail demandé est la réalisation de calculs dans le but de résoudre un problème numérique. Le problème à résoudre est conçu de façon qu'un validateur engageant une puissance de calcul c_i (à mettre en parallèle avec la capacité à fabriquer des rubans chaque semaine) gagnera avec une probabilité proportionnelle à c_i. Ces calculs ne servent à rien d'autre qu'à la distribution de l'incitation et donc dès qu'elle a eu lieu on ne garde rien des calculs qui sont parfaitement comparables aux rubans détruits.

Dans le cas de la méthode de la preuve d'enjeu, un validateur engage une somme en la mettant sous séquestre numériquement, ce que l'on sait faire sans avoir à lever l'anonymat, et il est rétribué avec une probabilité proportionnelle à cette somme mise sous séquestre, qui est l'équivalent de la somme s_i mise dans l'enveloppe envoyée à l'organisateur de la distribution.

L'évolution de ce que nous avons décrit pour «la méthode du travail» s'est produite pour les blockchains qui ont choisi la méthode de «la preuve de travail», ce qui est le cas du Bitcoin. Une industrie spécialisée dans ce calcul s'est progressivement mise en place, comparable à l'industrie des rubans de notre histoire. La compétition entre calculateurs est devenue de plus en plus forte et les moyens engagés pour mener les calculs de plus en plus importants.

SIX RÉACTEURS NUCLÉAIRES !

La logique économique incontournable, comme dans le cas des rubans, a conduit à l'utilisation de moyens industriels de calcul qui font qu'aujourd'hui l'électricité dépensée pour les calculs d'une cryptomonnaie comme le Bitcoin est équivalente à la production d'au moins six réacteurs nucléaires et sans doute trois fois plus. Une équipe de l'université de Cambridge a développé un outil de suivi en temps réel de cette consommation (*voir la bibliographie*). Cette dépense rogne les revenus des validateurs, comme le coût de fabrication des rubans diminue la somme S réellement distribuée par le mécène. Cette perte est absurde puisque la méthode de la «preuve d'enjeu» l'évite totalement (mais cette solution n'a été envisagée que plusieurs années après la création du Bitcoin). Il se trouve que le passage d'une méthode à l'autre n'est pas facile. Le Bitcoin ne l'envisage pas et restera économiquement inefficace et écologiquement scandaleux. Ethereum va passer de la preuve de travail à la preuve d'enjeu. Les cryptomonnaies récentes fonctionnent toutes selon la méthode de la preuve d'enjeu ou une variante.

De ces observations, retenons deux points principaux. La difficulté initiale provient de l'anonymat des validateurs. Si on y renonce, tout est assez simple. Les blockchains dites «privées» ou «de consortium» qui fonctionnent entre des utilisateurs en nombre limité et connus ne rencontrent de ce fait aucun problème de dépense électrique.

Même si on souhaite permettre aux validateurs d'une blockchain de cryptomonnaies de rester anonymes, les solutions de type «preuve d'enjeu» évitent aussi la dépense électrique et l'impact écologique de la «preuve de travail», qui apparaît comme une erreur initiale dans la conception du Bitcoin. Malgré l'admiration qu'on doit à Satoshi Nakamoto, l'inventeur de la première cryptomonnaie que fut le Bitcoin, sa «preuve de travail» est indubitablement une absurdité. Il est indispensable qu'elle soit abandonnée si on souhaite réellement que cette nouvelle sorte de monnaie se développe, permettant l'existence d'un argent liquide numérique anonyme respectueux de la vie privée de chacun. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. P. Delahaye, **Au-delà du Bitcoin. Dans l'univers de la blockchain et des cryptomonnaies,** Dunod, août 2022.

J. P. Delahaye, **Les arguments en faveur de la preuve d'enjeu (POS) et contre la preuve de travail (POW),** Institut Rousseau, janvier 2022. bit.ly/PLS536_LC_Rousseau

Consommation électrique du réseau Bitcoin mis à jour en continu par l'université de Cambridge ccaf.io/cbeci/index

J. P. Delahaye, **Au-delà du Bitcoin,** *Pour la Science*, n° 499, mai 2019.

V. Faure-Muntian *et al.*, **Les enjeux technologiques des blockchains,** OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques), 2018. bit.ly/PLS536_LC_OPECST

J. P. Delahaye, **Consommation électrique des cryptomonnaies et des blockchains, document pour France-Stratégie dans le cadre de la réflexion « La consommation électrique des technologies disruptives »** bit.ly/PLS536_LC_FranceStrat

L'AUTEUR

LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

NOBELLES POUR TOI

Une pièce de théâtre réhabilite des femmes scientifiques qui ont vu leurs travaux empêchés, entravés et même volés.

L'année 2020 a été un bon cru. Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna ont reçu le prix Nobel de médecine pour avoir mis au point la technique d'édition génomique CRISPR-Cas9. Andrea Ghez, celui de physique pour la découverte d'un objet compact supermassif au centre de notre galaxie, et Louise Glück celui de littérature pour sa voix poétique caractéristique, qui avec sa beauté austère rend l'existence individuelle universelle. L'année 2009 a même été un record, cinq femmes récompensées sur neuf prix Nobel distribués ! Mais hormis ces deux millésimes, les femmes brillent par leur absence dans le palmarès de la plus prestigieuse des récompenses : 58 nobélisées contre 885 hommes depuis 1901 ! La troupe de la Compagnie des Ondes a décidé de leur rendre justice en leur consacrant « Nobelles », une pièce de théâtre sous la forme d'une « Cérémonie pour les oubliées du prix Nobel ».

En science, ce déséquilibre est connu sous le nom d'« effet Matilda », qui consiste en un déni systématique de la contribution des femmes à la recherche scientifique. En conséquence, leurs travaux sont souvent récupérés, voire spoliés par leurs homologues masculins. Cet effet qui porte le prénom de la militante féministe américaine Matilda Joslyn Gage, a été théorisé en 1993, par l'américaine Margaret Rossiter, historienne des sciences.

Pour le mettre sur le devant de la scène, et tenter d'ouvrir les consciences sur ce problème, l'œuvre dramatique se propose de remettre au cours d'une cérémonie fictive des prix dans trois catégories : « La nobelle travestie », « La nobelle entravée » et « La nobelle dérobée ». Pour chacune d'elles, trois femmes scientifiques concourent. À quoi correspondent ces catégories ? La première concerne les femmes qui ont dû se déguiser en homme pour poursuivre leur activité scientifique. La seconde celles qui ont vu leurs travaux minimisés, non reconnus, ralentis, pour différentes raisons, mais essentiellement à cause de la gent masculine. La troisième réunit les femmes qui ont vu leurs résultats volés par des hommes qui s'en sont attribué… la paternité.

C'est l'occasion de découvrir ou redécouvrir le parcours de femmes de sciences, souvent extraordinaires et courageuses. Certaines sont connues, comme

© La Compagnie des Ondes

Une cérémonie pour les oubliées du prix Nobel, une pièce de théâtre de la Compagnie des Ondes.

la mathématicienne Sophie Germain, la physicienne (et femme d'Albert Einstein) Mileva Marić, la physico-chimiste Rosalind Franklin. D'autres le sont moins. Un exemple ? Dans la catégorie « Nobelle dérobée », Marthe Gautier est parvenue à mettre en évidence la cause de la trisomie 21, en l'occurrence un chromosome surnuméraire dans la vingt et unième paire. Cependant, le chercheur Jérôme Lejeune lui propose de faire des clichés dans un laboratoire mieux équipé… et en profite pour s'octroyer la découverte. La supercherie sera reconnue des décennies plus tard.

Inspirée de cérémonies existantes, la pièce alterne interviews, présentations des nommées, remises de prix et discours d'invitées d'honneur. Du beau monde parmi ces dernières avec la spécialiste des plantes indigènes africaines Mary Abukutsa-Onyango, la star hollywoodienne et pionnière du wifi Hedy Lamarr et la botaniste Janaki Ammal.

Mais le spectacle va au-delà de cette seule réhabilitation en jouant, avec humour, sur les codes. Le côté glamour et paillettes, souvent associé à la seule féminité, contraste avec la valeur des travaux présentés, accomplis par des femmes. Plus encore, à mesure que la cérémonie progresse, des grains de sable perturbent la belle mécanique du spectacle en invitant le spectateur, de façon interactive, à s'interroger, par exemple, sur le bien-fondé de l'idée même de remise de prix et sur la question de la compétition dans les sciences.

Le Nobel n'est hélas pas une exception, et pour d'autres pièces, la Compagnie des Ondes pourrait se pencher sur des prix tout aussi courus et tout autant monopolisés par des hommes, comme la médaille Fields en mathématiques, le prix Prizker en architecture, le prix Turing en informatique… ■

Nobelles. Cérémonie pour les oubliées du prix Nobel, par la Compagnie des Ondes, installée à Palaiseau. Prochaines dates à découvrir ici : www.comediedesondes.com/

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

GRAS ET MUSCLES BIEN BALANCÉS

Des balances prétendent mesurer le poids, mais aussi le pourcentage de graisse corporelle. Publicité mensongère? Non, propriétés électriques bien maîtrisées!

Certaines balances indiquent en plus du poids la composition corporelle. Ces informations sont déduites grâce à des mesures de conductivité électrique effectuées à l'aide d'électrodes situées sur la base de la balance et, pour certains modèles, sur l'accessoire pris en mains.

L'été approche, bientôt les vacances et la plage. Un rapide passage sur une balance s'impose pour d'éventuelles mesures à prendre avant le maillot de bain. Pour vous guider dans vos bonnes résolutions, de nouvelles balances électroniques connectées annoncent peser non seulement votre poids, mais aussi déterminer votre pourcentage de graisse corporelle. Face à cette promesse, le premier réflexe du physicien, même préoccupé par sa silhouette, est la circonspection. Ne serait-ce pas encore un message publicitaire à même d'attirer tous ceux qui luttent pour retrouver la ligne? La lecture de la notice rassure le circonspect: le fonctionnement de cette balance nécessite d'être pieds nus et la plante des pieds humide. Tout s'éclaire!

L'information sur la composition corporelle (masse graisseuse, musculaire, osseuse...) est obtenue par des mesures de conductivité électrique (*voir la figure page ci-contre*). Quel en est le principe? Sont-elles fiables?

UN CONDUCTEUR COMPLEXE

Déduire d'une simple mesure électrique la composition corporelle semble une gageure tant la conduction du courant électrique dans le corps humain est un phénomène complexe. La raison principale est l'hétérogénéité des tissus qui nous composent. Par ailleurs, si l'on pense par exemple aux cellules allongées des fibres musculaires, on comprend vite que le passage du courant dépend de l'orientation des fibres par rapport à la tension appliquée. Ajoutons enfin que les propriétés électriques de notre corps varient selon notre état d'hydratation, l'avancée de notre digestion... Pourtant, la comparaison entre la composition corporelle annoncée par ces balances et des mesures effectuées par d'autres moyens plus sophistiqués, comme l'IRM, montre la robustesse et la pertinence des résultats. Pourquoi? Parce que ces mesures électriques donnent accès à plusieurs quantités et que, combinées avec des informations supplémentaires sur la taille, l'âge et le sexe, elles sont comparées à des mesures faites sur des sujets témoins.

Pour comprendre, considérons une modélisation simplifiée d'un tissu biologique. La conduction du courant

© Illustrations de Bruno Vacaro

LA CONDUCTIVITÉ FAIT PARLER LE CORPS

Les informations sur la composition du corps sont révélées par la conductivité électrique de courants circulant *(à droite)* entre les électrodes *(à gauche, les cercles orange)* de la balance. Les ions du corps mis en mouvement par ces courants sont entravés par différents phénomènes physiologiques : ce phénomène est équivalent, électriquement parlant, à une résistance *(à gauche)*.

électrique par un matériau résulte du mouvement de charges électriques à l'intérieur de ce dernier. Dans le cas de tissus biologiques, plusieurs phénomènes interviennent. Lorsqu'une tension électrique est appliquée à un tissu, il apparaît en son sein un champ électrique qui met en mouvement les ions présents dans les cellules comme dans le fluide interstitiel qui les séparent. Le courant électrique créé est donc d'autant plus important que la concentration en ions est grande.

Deux obstacles entravent le mouvement de ces ions. D'abord, les collisions avec les molécules du liquide physiologique où ils baignent. Le résultat est qu'ils acquièrent quasi instantanément une vitesse moyenne constante, proportionnelle au champ électrique auquel ils sont soumis avec comme conséquence un courant électrique proportionnel à la tension appliquée. Ceci correspond électriquement au comportement d'une résistance.

Ensuite, pour les ions intracellulaires, l'affaire est compliquée par la présence des parois cellulaires. Celles-ci agissent comme un milieu isolant avec des ions positifs qui s'accumulent d'un côté et les ions négatifs de l'autre. Ces charges séparées créent un champ électrique qui s'oppose au champ appliqué. Le mouvement des ions se ralentit et l'on atteint un équilibre. D'un point de vue électrique, nous retrouvons un condensateur.

La cellule dans son ensemble qui combine conduction en son sein et parois chargées se comporte donc comme un condensateur en série avec une résistance (*voir la figure page suivante*). Cette association définit un temps caractéristique : la durée que met le condensateur à se charger lorsqu'on applique une tension ou à se décharger quand celle-ci devient nulle.

Quelles sont les conséquences sur la conductivité avec une tension alternative ? Si le courant est quasi continu ou de période supérieure au temps de charge, l'effet dominant est celui du condensateur

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

et la conductivité est nulle ou presque : on a affaire à un coupe-circuit. À l'inverse, avec des périodes plus courtes, l'effet du condensateur devient négligeable au profit de la résistance.

MODÉLISER ÉLECTRIQUEMENT LE CORPS

Imaginons maintenant un tissu biologique plus complexe constitué de cellules (dont les cellules graisseuses) et de liquide interstitiel et supposons que le contenu en ions soit le même dans tous les fluides. En pesant ce tissu, nous déterminons la quantité totale de matière. Comme la graisse conduit très mal le courant, la mesure de la conductivité en continu ou à basse fréquence n'est sensible qu'à la quantité de fluide interstitiel (les cellules sont en coupe-circuit) tandis que la conductivité à haute fréquence indique la quantité totale de fluide, à la fois interstitiel et intracellulaire. Finalement, trois mesures (le poids et les deux types de conductivité) révèlent trois grandeurs : la masse de graisse, la masse de tissus non adipeux et la masse de l'eau entre les cellules (associée à la rétention d'eau).

Qu'en est-il pour le corps humain, plus complexe encore avec notamment la présence des os et sachant qu'en outre, d'un point de vue électrique, d'autres phénomènes interviennent ? Par exemple, le champ électrique oriente les molécules d'eau, polaires, du liquide physiologique, ce qui a un effet électrique équivalent à celui d'un condensateur. Dans les faits, le principe reste le même : on mesure le poids de la personne, puis la conductivité électrique dans une gamme de fréquences afin de distinguer les différents effets physiques évoqués ci-dessus.

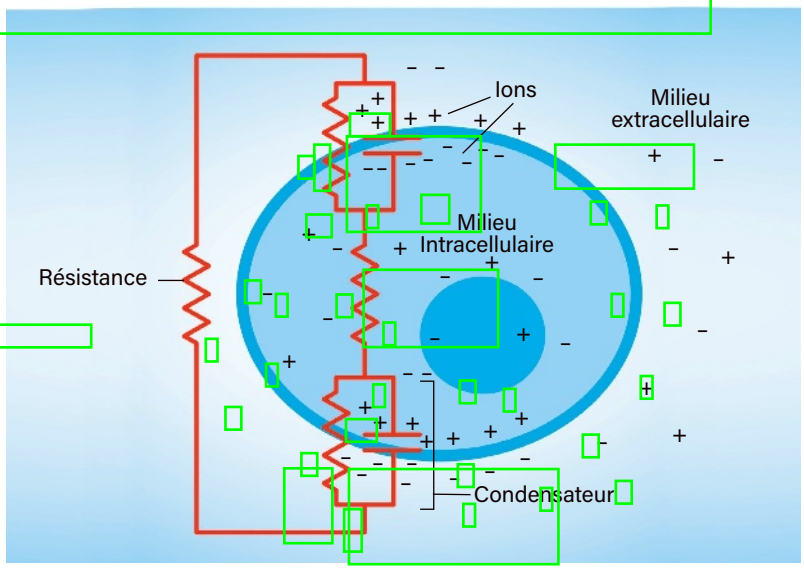
Dans les balances les plus simples, la conductivité est mesurée entre les deux pieds, ce qui correspond à un passage du courant dans les deux jambes et dans l'abdomen. On peut aussi trouver des dispositifs plus avancés reliés aux pieds et aux poings (*voir la figure pages précédentes*). Les mesures fournissent alors séparément des informations sur les quatre membres et le tronc.

Dans la pratique, on indique aussi à l'appareil la taille de la personne, son âge et son sexe afin d'affiner l'estimation de la composition corporelle. Comment se comparent ces résultats avec ceux obtenus par d'autres méthodes physiques plus sophistiquées ? Les mesures électriques donnent de très bons résultats pour la valeur moyenne des quantités mesurées entre les différents individus d'un groupe. Pour une seule personne, en revanche, les valeurs obtenues sont moins précises que celles fournies par des mesures sophistiquées. Cependant, elles restent suffisantes pour évaluer la situation et déterminer ce qu'il importe de faire pour, par exemple, perdre du poids. La personne a-t-elle assez de muscles pour avoir un métabolisme suffisant pour brûler des graisses ? Dans le poids total, quelle est l'importance relative de la graisse par rapport à celle de la rétention d'eau ? Ou encore, comment se répartissent graisse viscérale et graisse superficielle ?

Surtout, c'est pour le suivi que ces appareils ont un intérêt. Certes, les valeurs absolues données pour les différentes compositions ne sont pas précises à cause des spécificités morphologiques de chacun, mais ces spécificités n'évoluent pas. Aussi des mesures successives sur une même personne sont-elles donc particulièrement significatives. Elles indiquent alors parfaitement si la perte de poids observée résulte d'une perte de muscle ou de graisse. Ou bien à l'inverse si un poids qui se maintient est dû à un gain de muscle associé à une perte de graisse. Vous n'aurez plus d'excuses ! À vous les plages… de Grèce. ■

LES CELLULES INFLUENCENT LE COURANT

Une cellule, délimitée par une paroi de part et d'autre de laquelle s'accumulent des ions, agit comme un condensateur monté en série avec une résistance. Selon la nature du courant, c'est l'effet de l'un ou de l'autre qui domine.



BIBLIOGRAPHIE

D. Miklavčič *et al.*, **Electric Properties of Tissues,** in *M. Akay (Ed.) Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering,* John Wiley & Sons, 2006.

A. De Lorenzo *et al.*, **Predicting body cell mass with bioimpedance by using theoretical methods: a technological review ».** *Journal of Applied Physiology,* 1997.

ON A MENÉ L'

, TOUS LES PAPIERS SE RECYCLENT.

JOURNAUX, MAGAZINES, PAPIERS MÊME AVEC
AGRAFES, ENVELOPPES MÊME SANS FENÊTRE,
CAHIERS MÊME AVEC SPIRALES...
TOUS LES PAPIERS SE RECYCLENT.
EN LES DÉPOSANT DANS LE BAC DE TRI,
VOUS LEUR OFFREZ UNE NOUVELLE VIE.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

L'AUTEUR

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

LA CORNE DE LA DISCORDE

Si la classification des rhinocéros a si longtemps résisté aux biologistes de l'évolution, c'est à cause d'une sombre histoire de cornes…

Combien de cornes possède un rhinocéros ? La question peut paraître anodine. Pourtant, la réponse a longtemps fait de la classification des rhinocéros un casse-tête insoluble… jusqu'à récemment. Cette réponse est simple : sur les cinq espèces actuelles, certaines présentent une corne, d'autres deux. Mais tout se complique lorsque l'on regarde la distribution géographique de ces espèces. En Afrique, le rhinocéros blanc (*Ceratotherium simum*) et le rhinocéros noir (*Diceros bicornis*) possèdent deux cornes. Sur le continent asiatique, le rhinocéros indien (*Rhinoceros unicornis*) n'en présente qu'une. En revanche, les deux espèces des îles de la Sonde, en Indonésie, ne se ressemblent guère. Le rhinocéros de Java (*Rhinoceros sondaicus*) a une corne, tandis que celui de Sumatra (*Dicerorhinus sumatrensis*) en a deux. Ainsi, classer ces cinq espèces suivant la distribution géographique ou le nombre de cornes ne donne pas le même résultat. Comment établir leur phylogénie ?

UNE CORNE, DEUX CORNES, TROIS HYPOTHÈSES

Trois hypothèses ont été avancées. Et toutes conduisent à une phylogénie distincte. En 2010, Pierre-Olivier Antoine, paléontologue à l'université de Montpellier, et ses collègues ont proposé l'hypothèse «corne», qui regroupe les deux rhinocéros africains avec celui de Sumatra. Fondée sur la morphologie, elle a reçu à l'époque l'appui de la génétique, puis de l'analyse des protéines de l'émail dentaire. Mais l'année dernière, avec d'autres collègues, Pierre-Olivier Antoine a cette fois défendu l'hypothèse géographique, qui place tous les rhinocéros d'Asie ensemble, en se fondant sur un examen morphoanatomique, de

La plupart de ses congénères vivent à Sumatra, en Indonésie, mais en 2012 quelques individus ont été découverts dans la province indonésienne de Kalimantan, sur l'île de Bornéo. Quelques-uns vivraient peut-être aussi au Myanmar.

Hervé Le Guyader a récemment publié : **Ma galerie de l'évolution** (Le Pommier, 2021).

© DAHYATULQALBI/Shutterstock

EN CHIFFRES

80

Le rhinocéros de Sumatra est l'espèce la plus en danger. Sa population totale compte moins de 80 individus et a diminué d'au moins 80 % ces trente dernières années.

4

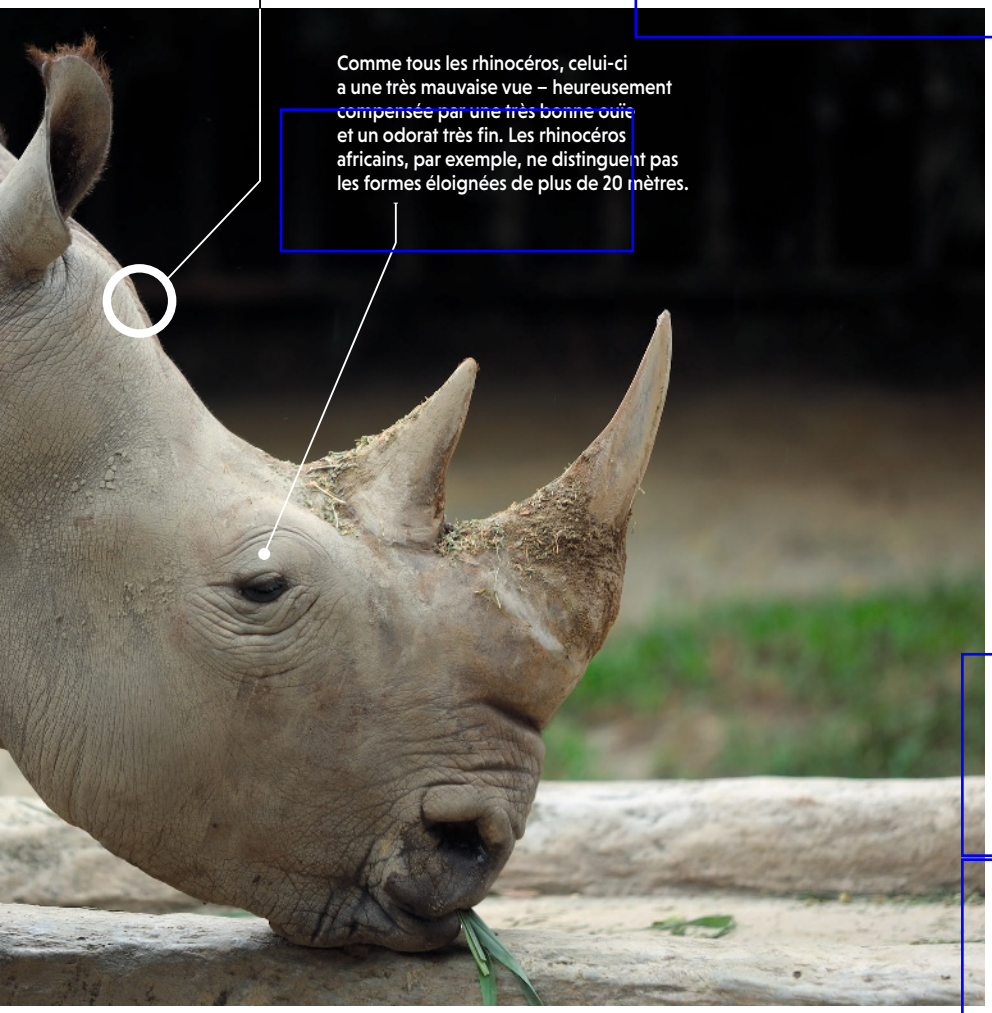
Mesurant jusqu'à 4 mètres de long et 1,8 mètre de haut au garrot, le rhinocéros blanc est le plus grand des rhinocéros vivants. Il pèse jusqu'à 3,5 tonnes et sa corne la plus longue a déjà atteint 1,5 mètre de long. Mais la licorne de Sibérie le dépassait : 5 mètres de long, 2,5 mètres au garrot, 4 à 5 tonnes, et une corne de 2 mètres…

65 MILLIONS

Les chevaux, tapirs et rhinocéros auraient divergé il y a environ 65 millions d'années, au moment de la crise Crétacé-Tertiaire, qui entraîna la disparition de nombreux organismes vivants, dont les dinosaures terrestres, les grands reptiles marins et 80 % des microorganismes marins.

Le rhinocéros de Sumatra est la plus petite des espèces actuelles de rhinocéros.

Comme tous les rhinocéros, celui-ci a une très mauvaise vue – heureusement compensée par une très bonne ouïe et un odorat très fin. Les rhinocéros africains, par exemple, ne distinguent pas les formes éloignées de plus de 20 mètres.



Rhinocéros de Sumatra
(Dicerorhinus sumatrensis)
Longueur : env. 2,4 à 3,2 m
Hauteur : de 1 à 1,5 m au garrot
Poids : env. 600 à 1000 kg

nouvelles analyses génétiques et la comparaison des séquences de collagène d'animaux actuels et éteints, une des rares protéines récupérables sur les fossiles. Entre-temps, cependant, Thomas Gilbert, de l'université de Copenhague, au Danemark, et ses collègues ont publié une analyse de l'ADN mitochondrial (contenu dans les mitochondries, les usines de production d'énergie des cellules) qui éloigne le rhinocéros de Sumatra de tous les autres en le plaçant comme groupe frère des quatre autres espèces. Comment distinguer la bonne hypothèse ?

Ces conflits montrent que les caractères successivement utilisés sont à faible résolution, c'est-à-dire insuffisants pour départager les hypothèses. Thomas Gilbert a donc rassemblé une équipe de choc, avec les chercheurs majeurs sur le sujet – dont Pierre-Olivier Antoine –, afin de trouver un ensemble de caractères de haute résolution permettant de construire une phylogénie fiable.

D'abord interrogée, la paléontologie a ajouté trois espèces fossiles du Pléistocène supérieur (entre 126 000 et 11 700 ans) à l'équation : la licorne de Sibérie (*Elasmotherium sibiricum*, une corne), le rhinocéros de Merck (*Stephanorhinus kirchbergensis*, deux cornes) et le rhinocéros laineux (*Coelodonta antiquitatis*, deux cornes). Toutes eurasiennes, mais elles aussi de situation phylogénique peu claire…

Puis, sachant que l'équipe de Donald Primerano, de l'université Marshall, aux États-Unis, venait de séquencer le génome du rhinocéros de Sumatra, l'équipe de Thomas Gilbert s'est tournée vers la phylogénomique, la classification fondée sur l'étude des génomes entiers. Elle a commencé par séquencer les génomes complets qui lui manquaient : ceux de deux rhinocéros actuels et des trois fossiles – une prouesse technique en soi. Puis, en ajoutant les génomes du cheval et du tapir comme groupe extérieur, elle a construit une phylogénie où, grâce au calibrage temporel fourni par les fossiles, elle a daté les spéciations.

Résultat : l'hypothèse géographique est privilégiée (*voir l'encadré ci-contre*). À partir d'un ancêtre vivant en Eurasie, la première spéciation, il y a 35 millions d'années, a donné naissance à la licorne de Sibérie, qui a peuplé une grande partie ouest de la Russie. Puis entre 16 et 15 millions d'années, à la fin du Miocène inférieur, au moment d'un optimum climatique très marqué (entre 17 et 14 millions d'années, la température était supérieure de 3 à 4 °C à aujourd'hui), une diversification massive a porté deux espèces dans la partie sud de l'Afrique, tandis que les autres restaient en Eurasie. La paléontologie a finement documenté cette période, où nombre d'animaux – giraffidés, suidés (phacochères…), viverridés (civettes…) – ont immigré en Afrique, tandis que d'autres – singes, éléphants – émigraient vers l'Eurasie. Les rhinocéros laineux et de Merck ont alors envahi l'ensemble du continent, tandis que l'Asie du Sud-Est était le siège d'un peuplement spécifique dont a émergé une branche à une corne.

Cette phylogénie explique pourquoi il était si difficile auparavant de situer le rhinocéros de Sumatra. Il se trouve isolé si on n'inclut pas les animaux fossiles, or une telle situation peut donner lieu à des artefacts de reconstruction phylogénétique. De plus, une analyse fine des génomes a mis en évidence un flux de gènes entre espèces dû à des hybridations. On comprend alors que des phylogénies construites à partir de portions de génomes aient donné des arbres différents.

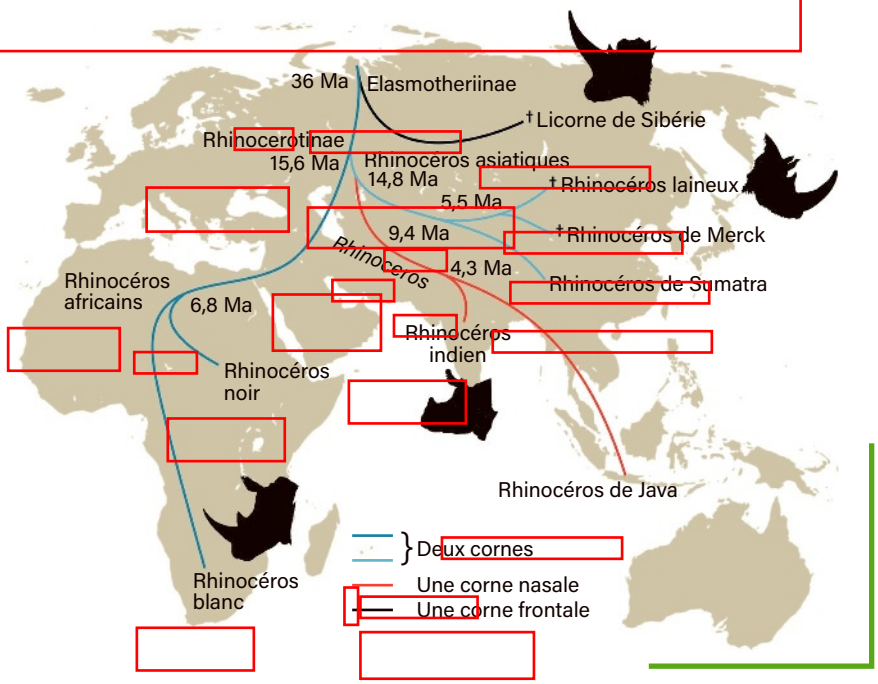
LA CONSANGUINITÉ N'EXPLIQUE PAS TOUT

Cerise sur le gâteau, comme souvent, le séquençage des génomes entiers a révélé des informations inattendues. D'abord, il a fourni une base pour évaluer la diversité génétique des rhinocéros éteints et actuels. Depuis longtemps, les généticiens constatent que la diversité génétique des rhinocéros actuels est bien basse, ce qui a été mis sur le compte de l'érosion des populations, qui aurait débouché sur une consanguinité importante. Mais les nouveaux résultats suggèrent que dès les espèces éteintes, la diversité génétique était faible dans la famille des rhinocéros comparée à d'autres herbivores et à plusieurs mammifères carnivores. Or, les populations d'herbivores étant plus importantes que celles des carnivores, on s'attend à une diversité génétique bien supérieure chez les premiers que chez les seconds. Ce résultat étonnant est important en biologie de la conservation, car il montre que le récent déclin des populations de rhinocéros a eu moins d'impact sur les aspects génétiques qu'on ne le pensait.

Ensuite, ô surprise, le séquençage des génomes a fourni l'explication d'une curiosité des rhinocéros, leur très mauvaise vue. En effet, l'analyse des génomes a mis en évidence des mutations du gène *IFT43*. Or la protéine que ce gène produit participe au transport intracellulaire de protéines le long des flagelles et des cils cellulaires. Quel rapport ? Les cellules en cônes ou en bâtonnets de la rétine fonctionnent grâce à l'accumulation d'opsines – des protéines photoréceptrices – dans une partie ciliée. Mais ces dernières ne jouent leur rôle que si elles se lient à un chromophore, le rétinal, une forme de la vitamine A. Or sans transport fonctionnel le long des cils, le rétinal ne rejoint pas les opsines. Les déficiences de la protéine IFT43 des rhinocéros seraient vraisemblablement l'une des causes de leur déplorable vue. ■

L'HISTOIRE DES RHINOCÉROS

L'étude des génomes entiers des cinq espèces actuelles et de trois espèces éteintes de rhinocéros a permis de reconstruire l'histoire de cette famille. La licorne de Sibérie a une place à part, car elle est apparue isolée il y a environ 35 millions d'années (Ma). Puis trois clades majeurs ont émergé : il y a 15 millions d'années est apparu un clade comprenant les deux rhinocéros africains, comme groupe frère de tous les autres animaux d'Eurasie. Ces derniers se sont ensuite très vite partagés en deux nouveaux clades, le premier avec les espèces indienne et de Java du genre *Rhinoceros (en rouge)* et le deuxième avec le rhinocéros de Sumatra accompagné des deux autres espèces fossiles, les rhinocéros laineux et de Merck.



BIBLIOGRAPHIE

S. Liu *et al.*, **Ancient and modern genomes unravel the evolutionary history of the rhinoceros family,** *Cell*, 2021.

P.-O. Antoine *et al.*, **A new rhinoceros clade from the Pleistocene of Asia sheds light on mammal dispersals to the Philippines,** *Zool. J. Linn. Soc.*, 2022 (en ligne le 22 mai 2021).

A. Margaryan *et al.*, **Recent mitochondrial lineage extinction in the critically endangered Javan rhinoceros,** *Zool. J. Linn. Soc.*, 2020.

© S. Liu et al., Cell, vol. 184, pp. 4874-4885, 2021 (CC BY 4.0)

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 ~~84,00 €~~	**79 €** Au lieu de ~~123,60 €~~	**99 €** Au lieu de ~~183,60 €~~
	30 % de réduction *	**36 %** de réduction *	**46 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

PAG22STD

Une question ? Contactez notre service clients à l'adresse : serviceclients@groupepourlascience.fr

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 ~~84,00 €~~
- 12 n° du magazine papier

☐ FORMULE **PAPIER + HORS-SÉRIE** — **79 €** Au lieu de ~~123,60 €~~
- 12 n° du magazine papier
- 4 n° des hors-séries papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99 €** Au lieu de ~~183,60 €~~
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 n° des hors-séries (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

* 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 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 7 € et les hors-séries pour 9,90 €.

1-FF-PAP-NT-1N-59€ 1-FF-PAP-NT-2N-79€ 1-FF-INT-NT-2N-99€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone : .....

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale) .....

.....

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

3 / Je retourne le bulletin d'abonnement et mon règlement

J'émets un chèque **à l'ordre de *Pour la Science*** du montant de l'abonnement.
J'adresse le bulletin et mon chèque par courrier postal à l'adresse suivante :

Service abonnement – Groupe Pour la Science –
235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne-Billancourt

COMMANDEZ PLUS SIMPLEMENT !
Pour découvrir toutes nos offres d'abonnement et effectuer un paiement en ligne, scannez le QR code ci-contre avec votre téléphone ou rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/CGV-PLS. 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.

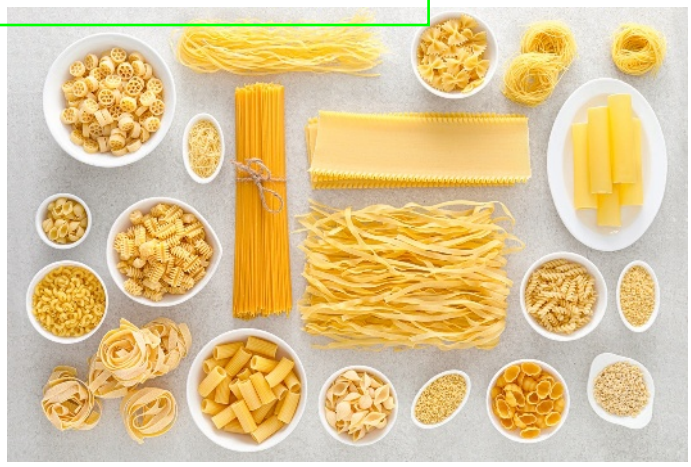
Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 - Sarl au capital de 32 000 € - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

L'AUTEUR

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

RÉINVENTONS LES PÂTES, VARIONS LEURS PROTÉINES !

Pour varier les goûts, utilisons les protéines de chairs animales, associées à différentes farines et liquides de cuisson.



Le blé et les œufs n'ont pas l'apanage des protéines indispensables à la préparation des pâtes.

Les pâtes sont classiquement les pâtes sèches ou les pâtes aux œufs. La farine des premières et l'œuf des secondes fournissent les protéines indispensables à leur fabrication, puis à leur cuisson. Mais ne pourrions-nous pas utiliser d'autres protéines pour les obtenir ? C'est ce que je viens de proposer à mon ami cuisinier Pierre Gagnaire, sous le nom de « boussaingault ».

Pour la confection des pâtes de blé les plus fréquentes, on part de farine, composée principalement de grains d'amidon et de protéines (notamment celles du gluten). Pour les pâtes dites « sèches » ne s'impose paradoxalement… qu'un peu d'eau : l'hydratation de la farine conduit à la formation d'un réseau de protéines qui enchâsse les grains d'amidon. Puis les pâtes sont mises en forme et séchées, prêtes à être plongées dans de l'eau bouillante pendant quelques minutes, afin que les grains d'amidon puissent s'« empeser », c'est-à-dire libérer des molécules d'amylose (un polymère linéaire du glucose) tandis que les molécules d'eau s'immiscent entre les molécules d'amylopectine (un polymère ramifié du glucose), faisant gonfler les grains.

Pour les pâtes aux œufs, ces derniers apportent des protéines qui, en coagulant, font le filet qui piège les grains d'amidon.

Mais l'œuf n'a pas l'apanage des protéines : il y en a en abondance dans les viandes, poissons ou crustacés. Pourquoi ne pas utiliser ces matières ? Les tissus musculaires des animaux sont constitués de faisceaux de fibres musculaires, des sortes de tubes allongés (jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres) et fins (un centième à un dixième de millimètre de diamètre), qui enferment ces protéines contractiles que sont les actines et les myosines, capables de coaguler – comme le savent bien ceux qui broient des chairs pour faire des terrines.

Pour des pâtes véritablement aux viandes ou aux poissons, il s'agit alors de choisir un tissu animal, par exemple un suprême de volaille ou de la chair de brochet, de le broyer très soigneusement, afin de bien libérer les protéines des fibres musculaires. Cette chair finement broyée, éventuellement additionnée d'un peu de liquide (un bouillon, du vin, etc.), nous l'ajouterons à de la farine, comme pour des pâtes aux œufs, jusqu'à ce que l'on obtienne une pâte de consistance appropriée : étalable sur une planche farinée pour des pâtes que l'on découpe avant d'en faire tomber des segments dans le liquide de cuisson, ou coulante si l'on emploie l'un de ces appareils à spaetzle qu'ont tous les foyers gourmands en Alsace.

On obtient alors des pâtes à la viande, au poisson ou au crustacé… Non pas des pâtes qui accompagneront de la viande, du poisson ou des crustacés, mais des pâtes intrinsèquement à la viande, au poisson ou au crustacé. Et puisqu'il y a une possibilité de confusion, je propose de nommer ces préparations des « boussaingaults », du nom du chimiste Jean-Baptiste Boussaingault, pionnier au XIXe siècle de la chimie agronomique. Ajoutons que comme on n'utilise pas ici les capacités réticulantes des protéines du gluten, s'ouvre l'éventail des farines qui n'en contiennent pas : de riz, de pomme de terre, de sarrasin, de châtaigne, que sais-je ? Bref, des boussaingaults à toutes les sauces. ■

RECETTE DE BOUSSAINGAULT À LA BRETONNE

❶ Compter 100 grammes de farine de sarrasin par convive.
❷ Broyer très soigneusement 50 grammes de filet de merlan par convive.
❸ Mêler les deux préparations.
❹ Puis ajuster la consistance, selon que l'on souhaite des pâtes à découper sur une planche (on aura alors finement étalé la pâte sur la planche farinée) ou des spaetzles.
❺ Faire revenir les arêtes du poisson dans un peu d'huile, puis cuire à couvert pendant 20 minutes, avec de l'eau, quelques carottes et oignons.
❻ Filtrer le bouillon de poisson et y cuire les pâtes.
❼ Puis, à un peu de cette eau de cuisson, ajouter de la crème et du beurre pour faire une sauce.

© Sea Wave/Shutterstock

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
	30 % de réduction *	**36 %** de réduction *	**46 %** de réduction *

Commandez plus simplement !
Pour découvrir toutes nos offres d'abonnement et effectuer un paiement en ligne, scannez le QR code ci-contre

BULLETIN D'ABONNEMENT

PAG22STD

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne-Billancourt – Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER** — 4,90 € PAR MOIS – 30 %
- 12 n° du magazine papier

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — 6,50 € PAR MOIS – 36 %
- 12 n° du magazine papier
- 4 n° des hors-séries papier

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — 8,20 € PAR MOIS – 46 %
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 n° des hors-séries (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Courriel : *(indispensable pour la formule intégrale)* .....
.....

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

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 7 € et les hors-séries pour 9,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/CGV-PLS.

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

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 : RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter

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

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

p.80 ATTAQUE SYBIL

L'anonymat est parfois un problème pour la sécurité informatique. Lors d'une « attaque Sybil », l'attaquant crée un grand nombre de fausses identités et les utilise pour avoir une influence disproportionnée. L'intérêt premier est de monopoliser d'importantes ressources dans certains systèmes de partage pair-à-pair. Mais certains adoptent aussi cette stratégie pour donner l'impression qu'une idée est très partagée sur les réseaux.

p.50 14 MILLIARDS

Les coûts sociétaux de l'endométriose, maladie où le tissu qui tapisse l'utérus colonise d'autres organes, s'élèvent à 14 milliards d'euros par an en France, qu'ils soient directs comme les soins de santé ou indirects comme la perte de productivité au travail.

p.44

« Pour contrôler les expériences de gain de fonction sur les virus, on pourrait envisager la création de « boîtes noires biologiques » dans les laboratoires P3 et P4, à la façon de celles qui équipent les avions »

ÉTIENNE DECROLY virologue à l'université Aix-Marseille

p.7 10 KM³

Le 15 janvier 2022, l'éruption d'un volcan sous-marin a détruit 90 % de l'île de Hunga Tonga Ha'apai, dans le Pacifique. Des géophysiciens ont estimé que le volcan a émis environ 10 kilomètres cubes de matière... la plus importante éruption du XXIe siècle à ce jour.

p.20 SYNDROME DE GALILÉE

Certains chercheurs qui se retrouvent marginalisés pour des idées farfelues se comparent indûment à Galilée, lui aussi incompris en son temps, et fustigent la communauté scientifique qui refuse d'admettre leur théorie révolutionnaire, comme si le fait de partager cette incompréhension cautionnait celle-ci – un comportement connu sous le nom de « syndrome de Galilée ».

p.92 LICORNE

Les licornes existent ! Ou plutôt ont existé, en Sibérie, il y a 35 000 ans. Elles ressemblaient cependant davantage aux rhinocéros actuels qu'aux chevaux. Avec ses 2,5 mètres au garrot, la licorne de Sibérie *(Elasmotherium sibiricum)* est même le plus grand rhinocéros connu. Sa corne mesurait pas moins de 2 mètres...

p.31 CATAN

Le plateau de structure hexagonale de ce jeu de société a inspiré une topologie de code correcteur d'erreurs pour les ordinateurs quantiques. Les qubits sont connectés suivant ce maillage hexagonal. L'intérêt de cette approche est de réduire certaines interférences par rapport à une topologie de type « échiquier », plus dense.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal : 5636 – Juin 2022 – N° d'édition : M0770536-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 262 623 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

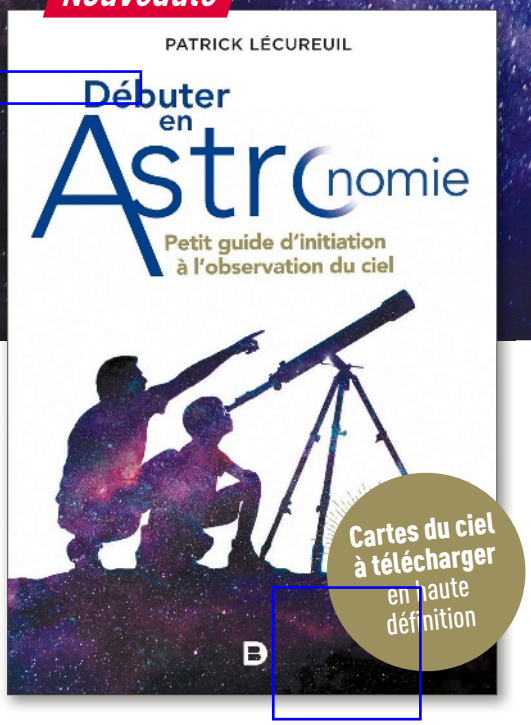
Diplômes d'Université de l'Observatoire de Paris

EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS		LUMIERES SUR L'UNIVERS
	Niveau	
Licence 1		Licence 1 à Master 1
	Suivi	
Formation en présentiel ou à distance Cours magistraux filmés et retransmis en direct ou en différé		Formation en ligne Tutorat personnel et individualisé Cours thématiques avec de nombreux exercices
	Objectifs	
Acquérir un panorama des connaissances actuelles en astronomie et astrophysique auprès d'astronomes professionnel·le·s		Acquérir des bases solides en astrophysique à travers les parcours thématiques proposés Se spécialiser grâce aux exercices suivis et corrigés à distance par un·e astronome professionnel·le
	Contenu	
Cours et TD (Mécanique Céleste, Ondes et Instruments, Soleil, Cosmologie, Galaxies etc.) Stage pratique d'une semaine à l'Observatoire de Meudon (optionnel et sous conditions) Stage d'observation à l'Observatoire de Haute Provence (optionnel et sous conditions)		Des parcours thématiques adaptés à tous : • Des étoiles aux planètes (L1-L2) • Cosmologie et Galaxies (L2) • Mécanique céleste (L3) • Sciences planétaires (L3) • Fondamentaux pour l'astrophysique (L3) • Fenêtres sur L'Univers (M1) • Instrumentation (M1) Plusieurs centaines d'exercices corrigés individuellement
	Pages Web	
http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/		http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/
	Contact	
contact.duecu@obspm.fr		contact.dulu@obspm.fr

Date limite d'inscription
4 septembre 2022
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Observer et photographier le ciel

Nouveauté



Débuter en astronomie

Petit guide d'initiation à l'observation du ciel

Patrick Lécureuil

1re édition | Mai 2022 | 128 pages | 9782807337183 | **12,90 €**

Ce guide d'initiation s'adresse à toute personne fascinée par l'astronomie, n'ayant aucune connaissance dans ce domaine mais qui souhaite se lancer dans l'observation contemplative du ciel étoilé.
Il offre tous les conseils nécessaires pour :

- **Découvrir les bases de l'astronomie ;**
- **Observer le ciel** à l'œil nu au fil des saisons ;
- **Choisir un instrument d'observation** (jumelles, lunettes et accessoires) ;
- **S'initier à la photo du ciel** au moyen d'un APN ou d'un smartphone.

Nouveauté

Astronomie en pratique

5 étapes pour observer, photographier et comprendre

Nicolas Dupont-Bloch

1re édition | Juin 2022 | 320 pages | 9782807337022 | **29,90 €**

Le guide idéal de **l'astronome amateur qui souhaite aller plus loin**, se demande comment choisir un instrument plus performant, **observer et photographier d'anciens volcans lunaires, des éruptions solaires**, une calotte polaire de Mars, **un astéroïde**, la Grande Tache Rouge et une éclipse sur Jupiter, reconnaître les gaz des nébuleuses et saisir des galaxies à plusieurs centaines de millions d'années-lumière en pleine ville.
Pour les astronomes amateurs et passionnés désireux de progresser dans leur exploration de l'Univers.