ENVIRONNEMENT **LE VRAI COÛT ÉNERGÉTIQUE DU NUMÉRIQUE**

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

L 13256 - 518 - F: 6,90 € - RD

DÉCEMBRE 2020
N° 518

ART ET SCIENCE
LA JOCONDE CACHAIT BIEN SES POINTS NOIRS

GÉOPHYSIQUE
DES CYCLONES DE PLUS EN PLUS DESTRUCTEURS ?

NEUROBIOLOGIE
LES MOLÉCULES DU TOUCHER SE DÉVOILENT

TROUS NOIRS

Le paradoxe de l'information bientôt résolu ?

BEL : 7,6 € - CAN : 11,6 CAD - DOM/S : 7,7 € - Réunion/A : 9,9 € - ESP : 7,6 € - GR : 7,6 € - ITA : 7,6 € - LUX : 7,6 € - MAR : 64 MAD - TOM : 1040 XPF - PORT. CONT. : 7,6 € - CH : 12,7 CHF - TUN/S : 9,1 TND

Institut du Cerveau ICM

BRAINCAST

La voix des neurones

Le podcast de *Cerveau & Psycho*

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

4ème épisode

Notre cerveau est le maître de l'illusion

www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/

4ème épisode

avec le Pr Lionel Naccache

interviewé par Sébastien Bohler

Neurologue et chercheur en neurosciences

Cerveau & Psycho

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

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

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

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Julien Bobroff, Maud Bruguière, Isabelle Crèvecoeur, Jean-Louis Hilbert, Naomi Mazzilli, Christophe Pichon, Timo Rey, Antoine Tilloy, Teva Vernoux, Loïc Villain

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@next2C.io
Adresse postale:
Pour la Science
Service Marketing
170bis boulevard du Montparnasse
75014 Paris
Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

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

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

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

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

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

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

LES TROUS NOIRS, CHAUSSE-TRAPPE OU SALUT

Objet du prix Nobel de physique décerné cette année, les trous noirs ont été imaginés par les théoriciens avant que des décennies d'observations astronomiques fassent admettre leur existence. Une existence devenue encore plus tangible grâce à deux avancées récentes. D'une part, depuis 2015, on détecte des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs, avec plusieurs dizaines de tels événements enregistrés à ce jour. D'autre part, il y a quelques mois, un réseau de radiotélescopes a produit la première image d'un trou noir : celui, supermassif, qui occupe le centre de la galaxie M87.

Les observations astronomiques de ces objets entrent ainsi dans une nouvelle ère. Elles fourniront, sur ces astres tellement massifs et compacts que leur gravité empêche jusqu'à la lumière de s'en échapper, des renseignements très attendus. Très attendus en particulier parce que les trous noirs posent aux théoriciens une grave difficulté.

En 1974, le célèbre chercheur britannique Stephen Hawking avait calculé qu'un trou noir doit émettre un faible rayonnement et donc que cette «évaporation» finit, au bout d'un temps très long, par le faire disparaître. Mais ce phénomène impliquerait que l'information relative à la matière engloutie par l'astre serait perdue à tout jamais, et cela contredit les lois de la physique quantique.

Comment résoudre ce paradoxe ? Le physicien américain Steven Giddings nous présente dans ce numéro les principales pistes envisagées (*voir pages 24 à 33*). Certaines supposent de revoir des concepts fondamentaux de la physique. Pour faire le tri, les futures observations seront cruciales. De plus, la solution au paradoxe de l'information est probablement liée à celle d'un problème encore plus vaste : celui de l'incompatibilité actuelle entre la théorie de la relativité générale, qui décrit les trous noirs, et la théorie quantique. Ainsi, ces astres étranges constituent aujourd'hui une chausse-trappe pour la physique théorique, mais il est possible qu'ils lui apportent demain le salut. ■

SOMMAIRE

N° 518 /
Décembre 2020

ACTUALITÉS

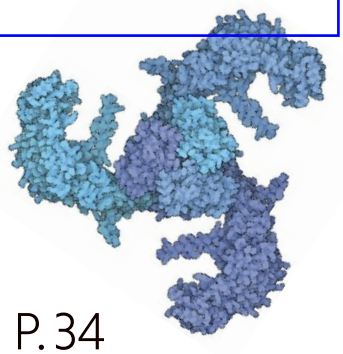
P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Covid-19: le point sur les vaccins
- La supraconductivité à 15 °C
- Un tardigrade à fluorescence anti-UV
- Le secret des forêts de pierre
- Un chromosome Y très «sapiens»
- L'antivirus des méristèmes
- Les «Alpes» de Pluton
- Des granules d'ARN dans la mitochondrie
- Nos chevaux ne sont pas anatoliens
- Les prix Nobel 2020

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 20
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Les sciences nous rendent-elles crédules?
Gilles Dowek

P. 22
QUESTIONS DE CONFIANCE
Combattre avec des caricatures
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS

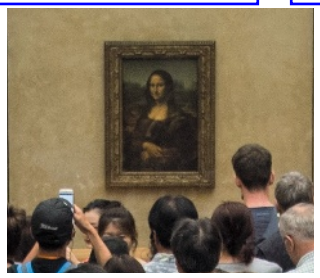


P. 34
NEUROBIOLOGIE
LES MOLÉCULES DU TOUCHER SE DÉVOILENT
Amber Dance

Comment les cellules détectent-elles le contact et la pression mécanique pour ensuite transmettre la perception tactile vers le cerveau? Après des décennies d'interrogations, les chercheurs ont découvert quelques-unes des protéines à la clé de ce processus.

P. 48
ENVIRONNEMENT
LE VRAI COÛT ÉNERGÉTIQUE DU NUMÉRIQUE
Anne-Cécile Orgerie et Laurent Lefèvre

Surfer sur internet, utiliser une application, regarder une vidéo en streaming, discuter en visio... Toutes ces activités qui paraissent aujourd'hui naturelles à nombre d'entre nous sont loin d'être anodines pour l'environnement.



P. 42
ART ET SCIENCE
LA JOCONDE AUSSI A DES POINTS NOIRS
Pascal Cotte et Lionel Simonot

Des chercheurs ont mis en évidence, pour la première fois, l'utilisation du *spolvero*, technique de transfert de dessin, sur le célèbre portrait de Mona Lisa peint par Léonard de Vinci.

P. 60
GÉOPHYSIQUE
DES CYCLONES PLUS DESTRUCTEURS?
Emmanuel Dormy et Ludivine Oruba

Ces dernières décennies, Katrina, Idai, Harvey et bien d'autres ouragans ont semé le chaos sur leur passage. Ces phénomènes paraissent plus fréquents et plus violents, mais le sont-ils réellement? La réponse des chercheurs est nuancée.

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 :
© Mondolithic Studios

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

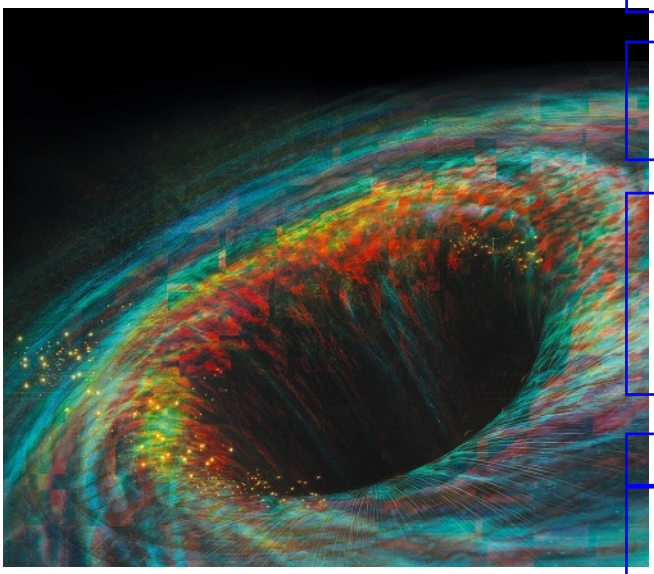
Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.

P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES

DES MATHÉMATICIENS DANS LA GRANDE GUERRE
David Aubin

Dans les années 1930, le groupe de mathématiciens Bourbaki a promu une vision abstraite et universelle de sa discipline en rupture avec celle de ses prédécesseurs. Le sacrifice de nombreux jeunes mathématiciens durant la Première Guerre mondiale a sans doute fortement contribué à ce revirement.

À LA UNE



P. 24
ASTROPHYSIQUE

TROUS NOIRS : COMMENT RÉSOUDRE LE PARADOXE DE L'INFORMATION ?
Steven Giddings

Alors que le prix Nobel de physique vient de récompenser trois spécialistes des trous noirs, ces étranges objets soulèvent encore d'importantes interrogations. En particulier, ils détruiraient l'information associée à la matière qu'ils engloutissent, ce qui serait contraire aux lois de la physique quantique. Un paradoxe que de nouvelles observations aideront à dissiper.

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS LA P. 70)

L'iode radioactif volatil, un gaz à piéger
En partenariat avec
IRSN

RENDEZ-VOUS

P. 82
LOGIQUE & CALCUL

ENVOYER DES MESSAGES À RETARDEMENT
Jean-Paul Delahaye

La science cryptographique étudie les moyens de livrer une information en fixant une date avant laquelle elle restera cachée et inaccessible. Un problème de mieux en mieux résolu.

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
Bien ventiler pour bien respirer
Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik et Benoît Semin

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Des chauves-souris et des virus
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Du café ou du thé pour détoxifier
Hervé This

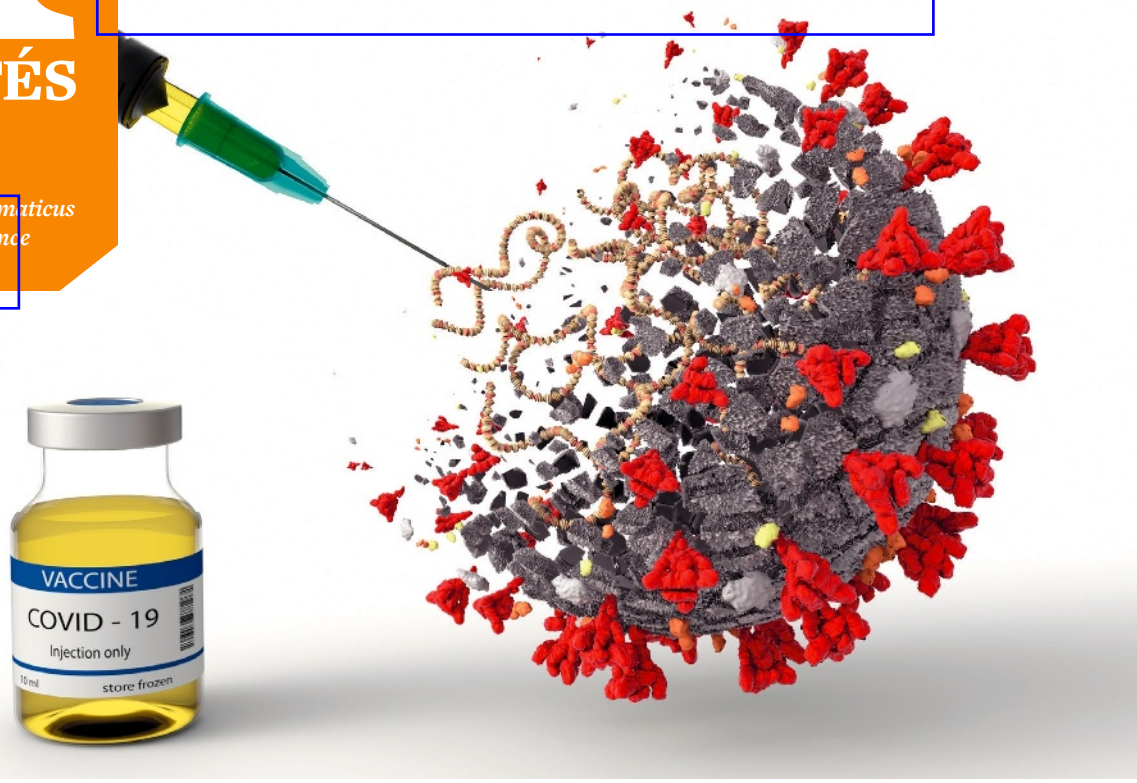
P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.16 *Livres du mois*
P.20 *Homo sapiens informaticus*
P.22 *Questions de confiance*

MÉDECINE

COVID-19 : LE POINT SUR LES VACCINS



© Shutterstock.com/Orpheus FX

Aujourd'hui, plusieurs centaines de candidats vaccins sont à l'étude et une dizaine sont en essai de phase III. Plusieurs seront testés par les 25 000 volontaires recrutés par l'Inserm.

Depuis son émergence sur un marché chinois, le virus SARS-CoV-2 a fait plus de 1,2 million de morts de par le monde. Pour contrer ce nouvel agent pathogène, la recherche, publique et privée, a déployé comme jamais de formidables ressources afin de mettre au point un vaccin qui pourrait libérer le monde de toute mesure de confinement. Depuis la publication de la séquence du génome viral en janvier 2020, la compétition est féroce et les annonces, plus ou moins étayées, sont nombreuses. Comment s'y retrouver ? En faisant un tour d'horizon des différents projets en lice et de leur degré d'avancement, comme s'y est notamment attelé Florian Krammer, de la faculté de médecine Icahn du mont Sinaï, à New York.

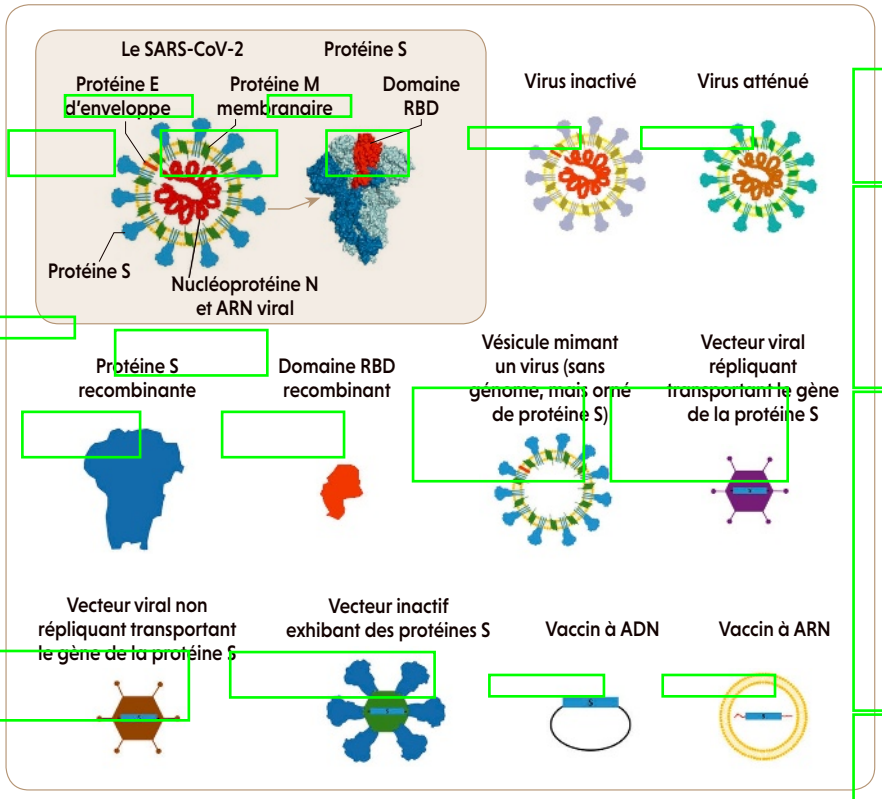
Les chercheurs ne partaient pas de rien. De fait, les coronavirus ont défrayé la chronique à l'occasion de deux épidémies, celle du SRAS en 2003 et celle du MERS en 2012. Des travaux visant à mettre au point des vaccins contre les deux agents pathogènes ont bien été lancés, mais ils ont vite été abandonnés. Néanmoins, grâce aux connaissances acquises à cette occasion et après l'obtention de la structure précise du SARS-CoV-2, la cible à privilégier pour un éventuel vaccin a vite été repérée (*voir la figure page ci-contre*). Il s'agit de la protéine S (pour *spike*), et plus précisément sa région RBD (*receptor binding domain*), avec laquelle le virus se fixe au récepteur (l'enzyme ACE2) des cellules qu'il va infecter.

Cette identification rapide représente un gain de temps énorme dans la conception d'un vaccin, qui d'ordinaire réclame quinze années de travaux. C'est une moyenne : celui contre les oreillons fut disponible en quatre ans, il fallut patienter trente-quatre ans pour celui contre la varicelle, et l'on attend toujours celui contre le VIH…

Contre le SARS-CoV-2, la diversité des techniques (*voir la figure page ci-contre*) utilisées dans l'élaboration des candidats vaccins est peut-être un facteur enjoignant à l'optimisme. À côté des méthodes traditionnelles, comme les vaccins à base de virus atténués ou inactivés, d'autres sont plus récentes et n'ont fait leurs preuves que depuis peu. C'est le cas des protéines recombinantes (fabriquées par des organismes génétiquement modifiés) et des vecteurs viraux. Enfin, les vaccins à ADN et ARN sont des méthodes qui n'ont encore jamais abouti à leur mise sur le marché.

Une course contre la montre

Quels qu'ils soient, les candidats se doivent de franchir avec succès les trois phases d'essais qui jalonnent la mise au point d'un vaccin et pendant lesquelles



Les différents types de vaccins à l'étude contre le Covid-19

on teste la toxicité, l'efficacité, le bénéfice par rapport à d'autres produits... Avec le SARS-CoV-2, on a vu à plusieurs reprises les phases des essais se chevaucher et non plus se succéder. Preuve de l'ardeur des concepteurs, le premier essai de phase I a eu lieu dès mars 2020, sous la houlette de l'Institut américain des maladies allergiques et infectieuses (le NIAID). Il est toujours en cours et les résultats sont attendus en 2022. Et à ce jour (le 6 novembre), plus de 200 candidats vaccins sont en cours de développement, à différents stades d'essai clinique (plus de 150 sont encore en phase préclinique).

Lesquels sont les plus avancés? Trois virus inactivés sont testés en phase III par des équipes des entreprises chinoises Sinovac et Sinopharm. Également en phase III, on trouve quatre vecteurs viraux non répliquants, c'est-à-dire des virus dont on a ôté le génome pour le remplacer par le seul gène de la protéine S. Le principe est que ces vecteurs «infectent» des cellules, sans entraîner de maladie, et les obligent à produire la protéine S afin que l'organisme apprenne à la reconnaître et la neutraliser quand il y sera confronté lors d'une infection au SARS-CoV-2. Cette technique a été choisie par la société AstraZeneca en collaboration avec l'université d'Oxford, l'Institut de biotechnologie de Pékin en association avec l'entreprise CanSino Biologics Inc., l'institut de recherche russe Gamaleya, et les laboratoires pharmaceutiques Janssen.

Deux autres candidats vaccins en phase III sont fondés sur de l'ARN. Cet acide nucléique cousin de l'ADN est aussi porteur d'une information génétique (le génome du SARS-CoV-2 est sous cette forme). Le vaccin consiste en un ARN codant la protéine S qui, introduit dans des cellules, conduirait à la synthèse de celle-ci. Cette méthode est celle retenue par la société Moderna, avec le NIAID, ainsi que par le trio Pfizer/BioNTech/Fosun.

Enfin, depuis le 24 septembre, l'entreprise américaine Novavax a lancé un essai de phase III avec un candidat vaccin fondé sur une sous-unité protéique virale. Au total, dix candidats vaccins sont donc d'ores et déjà en phase III. Précisons que l'essai du ChAdOxnCoV-19 élaboré par AstraZeneca et l'université d'Oxford a repris après une interruption de trois jours, due à l'apparition d'une maladie inexpliquée chez l'un des sujets suivis: un comité indépendant, l'Autorité de réglementation sanitaire des médicaments (MHRA), a confirmé que le produit ne présentait pas de danger.

Deux produits sont déjà utilisés, avant la fin de la phase III: celui de CanSino est administré dans l'armée chinoise, et celui de Gamaleya (Sputnik V), au cœur de nombreuses controverses, a été approuvé en Russie et proposé à l'intérieur du pays aux militaires et aux enseignants.

Que sait-on déjà de l'efficacité des différents candidats vaccins? L'immunogénicité, c'est-à-dire la capacité à déclencher la production d'anticorps neutralisants, varie selon les produits: plus faible pour les virus inactivés et les vecteurs viraux, elle est maximale pour les protéines recombinantes, et intermédiaire pour les ARN. La tolérance est meilleure pour les protéines recombinantes et les virus atténués.

En France, l'un des projets les plus avancés (en phases I et II) est le candidat vaccin développé par le laboratoire français Sanofi avec le britannique GlaxoSmithKline sur le principe d'une protéine S recombinante. Un autre, fondé sur le virus de la rougeole, est porté par l'institut Pasteur: un essai de phase I est en cours.

Toujours en France, des essais de phases II et III sont prévus dans les prochains mois. Impliquant des groupes d'individus plus importants, l'Inserm a lancé le 1er octobre une plateforme nommée Covireivac destiné à recruter des volontaires. L'objectif de réunir 25000 personnes a été rapidement atteint.

La grande question reste: quand un vaccin fiable sera-t-il disponible? Selon les spécialistes, c'est une affaire de mois et non pas d'années. On peut donc espérer un vaccin au mieux d'ici à mi-2021. D'autant plus que plusieurs chaînes de production sont prêtes et n'attendent que le feu vert des autorités compétentes pour fabriquer à grande échelle des doses de vaccin. C'est une bonne nouvelle, même si la prudence s'impose, tant les délais ont été considérablement raccourcis. ■

LOÏC MANGIN

F. Krammer, SARS-CoV-2 vaccines in development, *Nature*, vol. 586, pp. 516-527, 2020

Retrouvez tous nos articles sur le Covid-19 en accès libre sur www.pourlascience.fr

© F. Krammer, Nature

PHYSIQUE

LA SUPRACONDUCTIVITÉ À 15 °C

L'étape symbolique de la supraconductivité à température ambiante a été franchie… mais à très haute pression, ce qui limite encore les perspectives d'application.

Dans un matériau supraconducteur, le courant électrique circule avec une résistance nulle, et donc sans perte d'énergie. Ce phénomène découvert par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes en 1911 se manifestait initialement dans des matériaux refroidis à des températures proches du zéro absolu (−273 °C). Malgré ces contraintes de température, la supraconductivité est aujourd'hui utilisée notamment pour produire de puissants champs magnétiques dans les dispositifs d'imagerie médicale ou les accélérateurs de particules – des installations qui nécessitent d'encombrants et coûteux systèmes de refroidissement. Est-il possible de s'affranchir de ce régime de très basse température? Pour la première fois, une équipe, menée par Ranga Dias, de l'université de Rochester, aux États-Unis, a réussi à observer la supraconductivité à température ambiante.

Les physiciens ont longtemps cru cet exploit impossible. En 1957, les Américains John Bardeen, Leon Cooper et John Robert Schrieffer ont expliqué l'origine de la supraconductivité: les électrons du matériau s'associent par paires et circulent alors sans résistance (on parle de théorie BCS, des initiales de ses auteurs). L'interaction avec les quanta de vibrations (les «phonons») du réseau cristallin du matériau assure la cohésion de ces paires dites «de Cooper». Mais si la température est trop élevée, l'agitation thermique brise les paires et la supraconductivité disparaît. On pensait qu'il ne serait pas possible d'observer ce phénomène à plus de 30 kelvins, mais des expériences ultérieures sur des céramiques ont montré que cette limite n'était pas une fatalité.

En 1968, le Britannique Neil Ashcroft a suggéré que des matériaux riches en hydrogène pouvaient devenir supraconducteurs à des températures élevées. Les vibrations à haute fréquence de l'hydrogène favoriseraient en effet la formation des paires d'électrons. Mais pour que l'hydrogène gazeux puisse devenir solide, il faut exercer des pressions gigantesques. Cette piste a été validée en 2015 grâce à l'équipe de Mikhail Eremets, de l'institut Max-Planck de chimie, à Mayence, en Allemagne, qui a ainsi atteint la supraconductivité avec un mélange d'hydrogène et de soufre à −70 °C et sous une pression de 90 gigapascals. Ce record a ensuite été dépassé, toujours avec un mélange à deux éléments.

La supraconductivité est en général obtenue à des températures très basses. Elle permet de faire léviter des objets ou de faire circuler un courant électrique sans perte. À température ambiante, les applications seraient nombreuses.

267 gigapascals

CETTE PRESSION (2,67 MILLIONS DE FOIS LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE AU NIVEAU DE LA MER) EST OBTENUE GRÂCE À UNE PRESSE À ENCLUMES DE DIAMANT.

Pour atteindre la supraconductivité à 15 °C, Ranga Dias et ses collègues ont appliqué une pression de 267 gigapascals à un mélange de trois éléments (hydrogène, soufre et carbone). L'une des difficultés de l'expérience a été de déterminer la bonne proportion d'hydrogène à ajouter. Pas assez d'hydrogène, le matériau ne manifeste pas de supraconductivité; trop d'hydrogène, il faut appliquer des pressions énormes pour que le matériau se structure de façon adéquate. En outre, la structure exacte du matériau supraconducteur n'est pas encore précisément connue.

Pour les spécialistes, ce résultat obtenu avec trois éléments ouvre la porte à l'exploration de nouvelles combinaisons avec autant de composants, voire plus. En trouvant les bonnes proportions, il sera alors peut-être possible de réaliser la supraconductivité à température ambiante et à des pressions raisonnables. ■

SEAN BAILLY

E. Snider *et al.*, *Nature*, vol. 586, pp. 373-377, 2020

© J. Adam Fenster/université de Rochester

PHYSIQUE

COULÉE VISQUEUSE MAIS RAPIDE

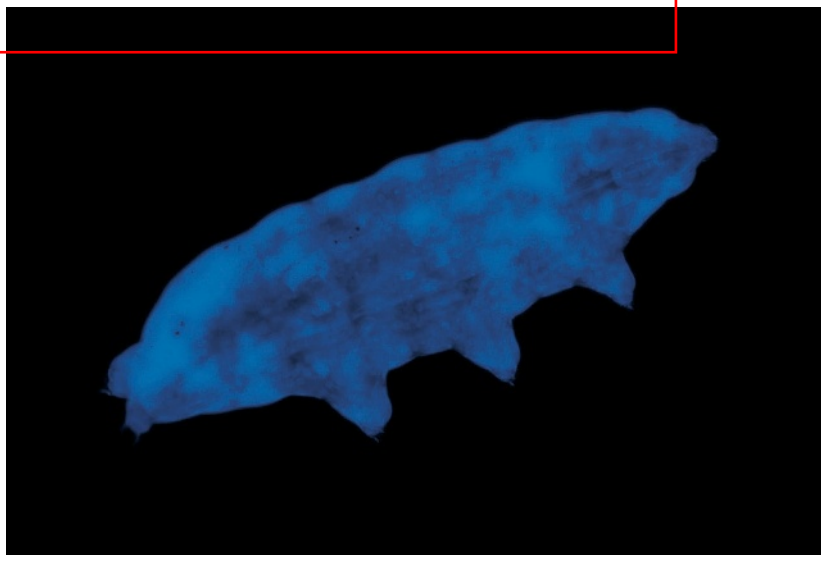
Étonnant : un liquide visqueux (comme du miel) s'écoule plus rapidement qu'un liquide fluide… dans des conditions très particulières. Maja Vuckovac et ses collègues, de l'université d'Aalto, en Finlande, ont étudié des gouttes de diverses viscosités dans des microtubes fermés dont l'intérieur est recouvert d'un revêtement superhydrophobe. Soumise à la gravité, une goutte pèse sur l'air du tube situé en dessous. En temps normal, le gaz reste coincé. Mais grâce au revêtement, le liquide n'adhère pas aux parois et l'air peut remonter le long de celles-ci. La goutte de liquide descend alors dans le microtube. La couche d'air longeant les parois étant d'autant plus stable que le liquide est visqueux, ce sont les liquides les plus visqueux qui coulent le plus vite ! ■

THÉO TORCQ

M. Vuckovac *et al.*, *Science Advances*, vol. 6, article eaba5197, 2020

BIOLOGIE ANIMALE

UN TARDIGRADE À FLUORESCENCE ANTI-UV



Grâce à des pigments fluorescents, ce tardigrade émet de la lumière bleue quand il est exposé à un rayonnement ultraviolet.

Rien ne fait peur aux tardigrades. Ces minuscules animaux survivent à des conditions extrêmes de température et de pression, hautes ou basses, à des rayonnements ionisants ou même au vide de l'espace. Parmi les quelque 1 200 espèces connues, certaines résistent aux ultraviolets (UV), rayonnement pouvant être très néfaste aux organismes vivants, notamment parce qu'il détruit les molécules d'ADN. Mais le mécanisme de résistance est la plupart du temps inconnu. Or Harikumar Suma et ses collègues de l'Institut indien des sciences, à Bengalore, viennent de découvrir dans des mousses une nouvelle espèce de tardigrades qui résistent aux UV, et ces chercheurs ont compris le mécanisme.

Pour tester la résistance de ces animaux, du genre *Paramacrobiotus*, à différentes conditions extrêmes, les chercheurs les ont notamment placés sous une lampe à UV. Avec une exposition de quinze minutes, à raison de 1 kilojoule par mètre carré, tous les individus étaient encore vivants trente jours plus tard. Soumis aux mêmes conditions, les tardigrades *Hypsibius exemplaris* mouraient tous dans les vingt-quatre heures suivant l'exposition. Avec une exposition de une heure, 60 % des tardigrades *Paramacrobiotus sp.* survivaient et conservaient un comportement normal.

Les biologistes ont montré que lorsque le tardigrade *Paramacrobiotus sp.* est soumis à des UV, il émet de la lumière bleue par fluorescence. Des pigments absorbent le rayonnement nocif et le réémettent dans une gamme de fréquences moins dangereuse. Les chercheurs ont aussi recouvert de ces pigments des tardigrades *Hypsibius exemplaris* et des vers *Caenorhabditis elegans*, et ont constaté que ces animaux résistaient mieux aux UV que leurs congénères dépourvus de cette protection. ■

S. B.

H. R. Suma *et al.*, *Biology Letters*, vol. 16, 20200391, 2020

GÉNÉTIQUE

PLACENTA ET TABAC

Arrêter de fumer durant la grossesse apporte, pour la mère et l'enfant, des bénéfices qui ne sont plus à démontrer. Mais pour la première fois, l'équipe de Johanna Lepeule, de l'université de Grenoble-Alpes, de l'Inserm et du CNRS, vient de montrer que fumer avant la grossesse, même si l'on s'arrête avant celle-ci, n'est pas exempt de risques. Grâce aux données de la cohorte Eden, qui a suivi 568 femmes (classées en trois groupes : non fumeuses, anciennes fumeuses ayant arrêté dans les trois mois avant la grossesse, et fumeuses actives), les chercheurs ont identifié, chez les fumeuses et les anciennes fumeuses, de nombreuses modifications épigénétiques de l'ADN du placenta. Ces perturbations ne concernent pas les séquences des gènes, mais leur expression. Il reste à en évaluer les conséquences sur le déroulement de la grossesse, le développement du fœtus et la santé de l'enfant. ■

NOËLLE GUILLON

S. Rousseaux *et al.*, *BMC Medicine*, vol. 18, article 306, 2020

© H. R. Suma et al./Biology Letters, 2020

EN IMAGES

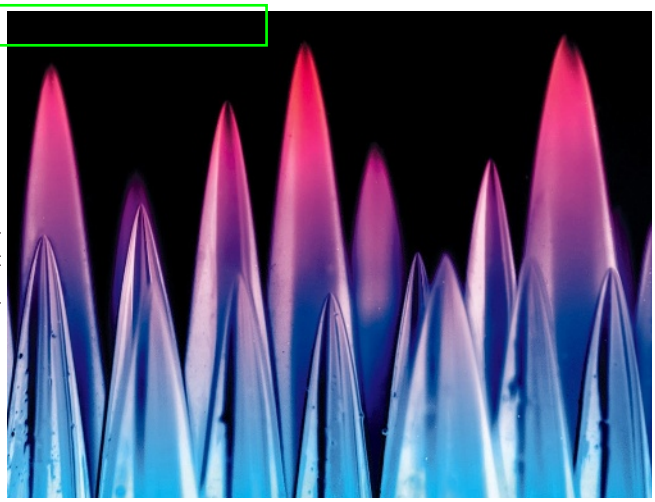
LE SECRET DES FORÊTS DE PIERRE

La réserve naturelle du Tsingy de Bemaraha, à Madagascar, abrite un paysage fascinant, une sorte de forêt pétrifiée (*ci-contre*). Celle-ci est constituée de hautes épines rocheuses et effilées. Il s'agit d'une structure géomorphologique typique des karsts, ces paysages dessinés par l'érosion hydrochimique et hydraulique des roches carbonatées, mais extraordinaire ici par son caractère très aiguisé. Le mécanisme de formation de telles forêts de pierre était jusqu'à présent inconnu.

Jinzi Mac Huang et ses collègues, de l'université de New York, ont mené une expérience avec un bloc de sucre cristallisé cylindrique au sommet arrondi et plongé dans de l'eau. Le sucre se dissout (à la façon des roches carbonatées) et, en quelques heures, le cylindre a perdu en volume et son sommet est devenu pointu. Grâce à la présence de microparticules illuminées par un laser, les chercheurs ont constaté qu'un flux vertical d'eau se forme le long de la paroi du bloc, alors que le liquide était initialement immobile. L'eau se charge en sucre dissous et, devenant ainsi plus dense, elle descend, entraînée par la gravité. Ce mouvement d'eau à la surface de l'objet accroît la vitesse d'érosion. Les chercheurs ont modélisé le phénomène et ont confirmé que le processus conduit à la formation de sommets pointus. L'équipe a aussi montré qu'avec un grand bloc poreux de sucre, l'eau s'infiltre dans les fissures verticales et finit par créer un ensemble d'aiguilles (*ci-dessous*) comme dans la forêt de pierre de Madagascar. ■

S. B.

J. Mac Huang *et al.*, *PNAS*, vol. 117(38), pp. 23 339-23 344, 2020



© Laboratoire de mathématiques appliquées/université de New York

© POZZO DI BORGO Thomas / shutterstock.com

PALÉOGÉNÉTIQUE

UN CHROMOSOME Y TRÈS « SAPIENS »

Une première comparaison des chromosomes Y des « Homo sapiens », des Dénisoviens et des Néandertaliens suggère deux métissages, à des époques distinctes, entre les lignées néandertalienne et « sapiens ».

Selon la plupart des paléoanthropologues, après la « principale sortie d'Afrique d'*Homo sapiens* » il y a quelque 80000 ans, nos ancêtres se sont métissés avec les Néandertaliens. Et si un autre métissage, bien plus ancien, avait aussi eu lieu? Autour de Martin Petr, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, une équipe de paléogénéticiens vient de mettre en évidence un phénomène de cet ordre: elle a établi que le chromosome Y (le chromosome sexuel mâle) néandertalien est un chromosome Y d'ancêtres d'*H. sapiens* introduit dans le génome pré-néandertalien il y a entre 100000 et 370000 ans.

Les chercheurs s'interrogeaient autant sur le chromosome Y des Néandertaliens que sur celui des Dénisoviens, l'autre espèce humaine eurasienne ancienne. En effet, comme tous les génomes néandertaliens ou dénisoviens entièrement séquencés sont ceux de femmes, on ne disposait que de très peu d'informations sur les chromosomes Y anciens.

Martin Petr et ses collègues ont extrait de l'ADN ancien de trois fossiles d'hommes néandertaliens et de deux fossiles d'hommes dénisoviens datant d'il y a 40000 à 136000 ans. Ils ont ensuite utilisé les techniques chimiques de la paléogénétique pour reconstituer au mieux cet ADN extrêmement dégradé, et obtenu des séquences longues de 6,9 millions à seulement 560 milliers de bases du chromosome Y (sur 57 millions de bases en tout). Or il s'avère que les versions communes de gènes (polymorphismes) dans ces séquences du chromosome Y sont souvent différentes dans le cas des Dénisoviens et des *sapiens*, mais sont proches ou identiques dans le cas des Néandertaliens et des *sapiens*. En clair, le chromosome Y des Dénisoviens est... dénisovien, tandis que celui de la lignée néandertalienne provient, manifestement, de la lignée *sapiens*.

D'après l'horloge génétique – c'est-à-dire d'après les nombres de mutations accumulées –, ces séquences du chromosome Y suggèrent qu'environ 700000 ans se sont écoulés depuis la séparation des populations ancestrales des Dénisoviens et des *sapiens*, tandis que 100000 à 370000 ans se sont écoulés depuis la séparation des populations ancestrales des Néandertaliens et des *sapiens* qui s'étaient métissées.

Les clans de chasseurs-cueilleurs pré-*sapiens* et pré-néandertaliens se sont croisés il y a quelque 350000 ans. Où? Cela reste à déterminer.

Ce résultat n'est pas sans rappeler l'observation faite en 2017 par Cosimo Posth, de l'institut Max-Planck d'histoire humaine, à Tübingen, concernant l'ADN mitochondrial, celui contenu dans les mitochondries, organites qui fournissent aux cellules leur énergie. Ce chercheur avait montré que l'ADN mitochondrial des Néandertaliens provenait aussi de la lignée *sapiens* et, par l'horloge génétique, avait daté son arrivée entre 220000 et 470000 ans.

Or, à ces époques très anciennes, il n'y avait ni Néandertaliens ni *sapiens*, mais seulement des pré-Néandertaliens et des pré-*sapiens*. Ces résultats suggèrent donc un très ancien métissage entre des populations d'ancêtres d'*H. sapiens* et d'*H. neanderthalensis*. Où? Nous l'ignorons, mais comme aucun métissage ancien comparable ne s'est produit entre *H. sapiens* et Dénisoviens, cela ne peut qu'être à l'ouest. En Europe? Au Proche-Orient? En Afrique du nord, où vivaient des *H. sapiens* archaïques il y a quelque 300000 ans? ■

FRANÇOIS SAVATIER

M. Petr *et al.*, *Science*, vol. 369, pp. 1653-1656, 2020

© Shutterstock.com/Gorodenkoff

EN BREF

POLLUTION DE L'AIR ET COVID-19

Beaucoup des formes sévères ou des morts dues au Covid-19 sont associées à des facteurs de comorbidité (âge, obésité, problèmes cardiaques). Jos Lelieveld, de l'institut Max-Planck de chimie, à Mayence, et ses collègues ont utilisé des données épidémiologiques et des cartes satellitaires pour estimer l'impact de l'exposition durable aux particules fines de la pollution atmosphérique. Conclusion : 15 % des morts du Covid-19 seraient dues à ce facteur.

Cardiovascular Research, 26 octobre 2020

ULTRABLANC

On connaissait le Vantablack, ce matériau qui battait des records d'absorption de la lumière. À l'opposé, l'équipe de Xiulin Ruan, de l'université Purdue, aux États-Unis, vient de développer une peinture à base de carbonate de calcium qui réfléchit 95,5 % de la lumière solaire (80 à 90 % pour les produits actuellement dans le commerce). Utilisé sur des bâtiments, ce revêtement pourrait ainsi empêcher l'accumulation de chaleur et limiterait le besoin de systèmes de climatisation, très énergivores.

Cell Reports Physical Science, 21 octobre 2020

DAVANTAGE D'EAU SUR LA LUNE

On pensait que seules les zones d'ombre permanente des cratères profonds situées aux pôles lunaires cachaient de la glace d'eau. Le reste, un grand désert sec ? Peut-être pas, indiquent les observations du télescope aéroporté *Sofia* et de la sonde *LRO*. Paul Hayne, de l'université du Colorado à Boulder, et ses collègues pensent que de l'eau se cacherait en particulier dans des microzones d'ombre permanente un peu partout à la surface. La Lune pourrait y abriter jusqu'à 1 million de tonnes d'eau.

Nature Astronomy, 26 octobre 2020

© Shutterstock.com/Lehic (*en haut*) ; © Nasa/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute ; Thomas Pesquet/ESA (*en bas*)

BIOLOGIE VÉGÉTALE

L'ANTIVIRUS DES MÉRISTÈMES

En agronomie, la lutte contre les virus est un enjeu majeur. Ces microorganismes peuvent en effet provoquer des baisses de rendement, voire la perte de variétés intéressantes. Heureusement, les plantes offrent une solution étonnante : il est possible de régénérer un organisme infecté en récupérant et en cultivant *in vitro* ses méristèmes. Ces tissus, constitués de cellules souches et situés notamment à l'extrémité des tiges et des racines, assurent la croissance de la plante et présentent la particularité d'être préservés des infections d'une grande variété de virus. Alors que cette surprenante résistance est connue et exploitée depuis les années 1950, Haijun Wu, de l'université des sciences et de technologie de Chine, à Hefei, et ses collègues viennent d'en élucider le mécanisme moléculaire.

Les chercheurs ont inoculé le virus de la mosaïque du concombre à des plants d'*Arabidopsis thaliana* (l'arabette des dames), une plante modèle pour les scientifiques, et ont suivi sa progression. Ils ont montré que le virus ne peut pas se répliquer et se propager dans les tissus où la protéine Wuschel (WUS) est synthétisée. Cette molécule joue un rôle clé dans la régulation du fonctionnement du méristème et le devenir des cellules souches.

Le mécanisme de résistance aux virus des méristèmes a été élucidé chez l'arabette des dames *(ci-dessus)*.

Elle inhibe la synthèse de protéines en se fixant sur certains gènes impliqués dans la maturation des ribosomes, les complexes intracellulaires qui produisent les protéines. En cas d'invasion d'un virus, elle se fixe sur un gène particulier de la plante. Le virus ne peut alors plus détourner les mécanismes de la cellule pour produire les protéines nécessaires à sa réplication. Son invasion des tissus du méristème est donc bloquée. ■

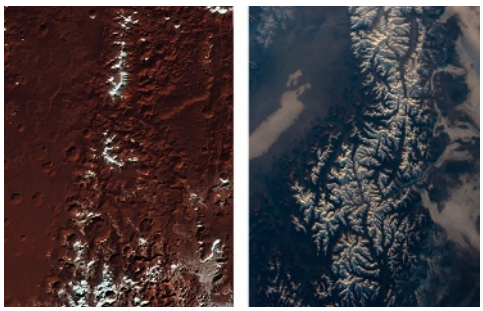
NICOLAS BUTOR

H. Wu *et al.*, *Science*, vol. 370, pp. 227-231, 2020

PLANÉTOLOGIE

LES « ALPES » DE PLUTON

À la surface de Pluton s'étalent des chaînes de montagnes recouvertes d'une couche de glace blanche et brillante, un paysage ressemblant beaucoup aux montagnes terrestres. Il s'agirait de glace de méthane formée à la faveur de phénomènes atmosphériques très différents des mécanismes de formation de la neige sur Terre. Grâce aux observations de la sonde spatiale *New Horizons*, qui a survolé la planète naine en 2015, Tanguy Bertrand, du centre de recherche Ames de la Nasa en Californie, François Forget, du Laboratoire de météorologie dynamique de Sorbonne-Université, à Paris, et leurs collègues ont précisé ce mécanisme. Sur Terre, la neige se condense en altitude, car l'air se dilate lors des mouvements ascendants et donc se refroidit. Sur Pluton, l'atmosphère



La région de « Cthulhu », près de l'équateur de Pluton *(à gauche)*, et les Alpes sur Terre *(à droite)* offrent des paysages similaires, mais formés par des processus très différents.

est froide au niveau du sol et devient plus chaude et riche en méthane en altitude. Ce n'est donc que sur les sommets les plus élevés, atteignant les plus hautes couches de l'atmosphère, que se forme la glace de méthane. ■

LUCAS GIERCZAK

T. Bertrand *et al.*, *Nature Communications*, vol. 11, article 5056, 2020

BIOLOGIE CELLULAIRE

DES GRANULES D'ARN DANS LA MITOCHONDRIE

Nichées dans les cellules, les mitochondries sont à ces dernières ce que les centrales électriques sont aux villes; elles fournissent l'énergie nécessaire aux nombreuses réactions chimiques du métabolisme. Organites de la cellule, elles ont la particularité d'avoir leur propre ADN, un matériel génétique exclusivement transmis par la lignée maternelle. En 2013, Jean-Claude Martinou, de l'université de Genève, et ses collègues avaient observé que l'ARN résultant de la transcription de l'ADN mitochondrial s'accumulait avec d'autres protéines sous la forme de granules dans ces organites. Mais les caractéristiques des granules et leur dynamique restaient à préciser. L'équipe menée par Jean-Claude Martinou et Suliana Manley, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, a utilisé des techniques de microscopie dites «à super-résolution» pour scruter avec précision l'architecture nanométrique des granules d'ARN. Dans ces derniers, dont la taille est d'environ 130 nanomètres, l'ARN est replié de façon compacte au sein d'un nuage de protéines, le tout formant une sorte de gouttelette liquide.

Ces granules, uniformément distribués dans la mitochondrie, sont capables d'échanger très vite leurs composants, de fusionner ou de se fractionner. Or ils renferment l'information génétique nécessaire pour fabriquer les protéines qui interviennent dans la production d'énergie de la cellule: une organisation souple et dynamique contribue ainsi à l'efficacité des mitochondries. Ces nouvelles connaissances aideront à envisager des stratégies pour lutter contre certaines maladies graves liées à un dysfonctionnement de ces organites. ■

© Shutterstock.com/RAJ CREATIONZS

Vue d'artiste d'une mitochondrie.

WILLIAM ROWE-PIRRA

T. Rey *et al.*, *Nature Cell Biology*, vol. 22, pp.1180-1186, 2020

PALÉOGÉNÉTIQUE

NOS CHEVAUX NE SONT PAS ANATOLIENS

Dès 6000 ans avant notre ère, des habitants des steppes ont commencé à apprivoiser des chevaux, mais on ignore où *Equus caballus* a été vraiment domestiqué. Pas en Anatolie en tout cas: autour de Eva-Maria Geigl, de l'institut Jacques-Monod, à Paris, une équipe de paléogénéticiens vient d'exclure ce haut plateau, pourtant favorable à la vie du cheval.

Les chercheurs ont recueilli l'ADN mitochondrial contenu dans une centaine de restes d'équidés d'Anatolie centrale, couvrant la période 9000-500 avant notre ère. Ils l'ont ensuite séquencé en partie et défini des marqueurs génétiques caractéristiques des dix-huit haplogroupes (groupes de gènes transmis ensemble) connus chez les chevaux. Il en ressort que jusqu'à 2000 avant notre ère, seuls étaient présents les trois haplogroupes des chevaux sauvages qui vivaient déjà en Anatolie avant la domestication du cheval, mais que vers cette date, pas moins de quatorze haplogroupes sont arrivés, tous représentés chez les chevaux domestiques modernes. D'où la conclusion que l'Anatolie n'est pas la région où *Equus caballus* fut domestiqué. ■

© Shutterstock.com/Hakan Tanak

L'Anatolie, terre de hauts plateaux steppiques, est un milieu convenant bien aux chevaux sauvages.

F. S.

S. Guimaraes *et al.*, *Science Advances*, vol. 6, eabb0030, 2020

EN BREF

MÉROVINGIEN, MAIS PAS FRANC

Près de Pontarlier, l'équipe de Michiel Gazenbeek, de l'Inrap, a fouillé un village mérovingien fondé au milieu du VI^e siècle et inhabituel par ses grands bâtiments, son église en bois et d'autres éléments. Le mobilier funéraire retrouvé suggère la richesse de certains habitants, notamment des guerriers. Des épées signent un contexte mérovingien. Selon Michiel Gazenbeek, la similarité du bâti avec ce qui existait alors en Bavière suggère qu'un groupe de Varasques – des Germaniques provenant de l'est, attestés dans la région – a été placé là par les Francs pour contrôler la vallée du Doubs.

Inrap, 7 oct. 2020 (https://bit.ly/3kW0dCA)

PALUDISME ET SAISON SÈCHE

Dans de nombreuses régions d'Afrique, les épisodes de paludisme se concentrent en saison humide, quand abondent les moustiques vecteurs du parasite *Plasmodium falciparum*, à l'origine de la maladie. Durant la saison sèche, les parasites peuvent persister chez l'hôte humain sans déclencher de symptômes. Comment ? Silvia Portugal, du centre hospitalier universitaire de Heidelberg, et ses collègues ont montré que les globules rouges infectés adhèrent moins aux parois des vaisseaux sanguins et sont mieux éliminés. Cela contribuerait à maintenir les parasites à bas niveau chez leurs hôtes, en attendant le retour des moustiques qui les disséminent.

Nature Medicine, 26 octobre 2020

© Alexis Baud/François Gauchet/Inrap

PHYSIQUE

LES TROUS NOIRS

Les physiciens se sont longtemps demandé si les trous noirs étaient réels, s'ils pouvaient se former dans le cosmos ou s'ils n'étaient que des artefacts des équations de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Le prix Nobel de physique récompense cette année Roger Penrose, théoricien qui a démontré que les trous noirs pouvaient se former dans des conditions réalistes, ainsi que Reinhard Genzel et Andrea Ghez. Grâce à des observations, dans les années 1990, ces deux derniers ont montré que le centre de la Voie lactée est occupé par un objet très massif d'environ 4 millions de masses solaires dans un volume plus petit que le Système solaire: une preuve indirecte de l'existence des trous noirs supermassifs nichés au centre des galaxies. ■

S. B.

https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/

MÉDECINE

LE VIRUS DE L'HÉPATITE C

Selon l'Organisation mondiale de la santé, 71 millions de personnes sont chroniquement infectées par le virus de l'hépatite C dans le monde – un chiffre probablement sous-estimé. En 2016, la maladie a entraîné le décès d'environ 399 000 personnes, principalement de cirrhose et de carcinome hépatocellulaire. Aussi la lutte contre l'hépatite C constitue-t-elle un enjeu majeur de santé publique. Les trois lauréats du prix Nobel 2020 de «physiologie ou médecine», les Américains Harvey Alter et Charles Rice, et le Britannique Michael Houghton, ont tous trois œuvré à une étape clé de cette lutte: la découverte du virus responsable de cette pathologie et sa caractérisation. Grâce à ces travaux, diverses équipes ont pu attaquer le virus sur tous les fronts à la recherche de traitements antiviraux. Aujourd'hui, un arsenal d'inhibiteurs permet de guérir plus de 95 % des patients traités. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2020/

CHIMIE

LES «CISEAUX GÉNÉTIQUES» CRISPR-CAS9

La Française Emmanuelle Charpentier et l'Américaine Jennifer Doudna, récompensées par le prix Nobel de chimie 2020.

Dans les années 2000, grâce à l'avènement du séquençage, généticiens et médecins purent lire à livre ouvert le génome de toute cellule. Cependant, lire est une chose, corriger en est une autre. C'est là qu'interviennent les travaux d'Emmanuelle Charpentier et de Jennifer Doudna, les deux chercheuses récompensées par le prix Nobel de chimie.

Tout commence par l'étude du «système immunitaire» des bactéries. En effet, plusieurs espèces gardent en mémoire des traces de virus qui les ont attaquées sous la forme de petits fragments d'ADN dans une sorte de bibliothèque notée CRISPR. Ces archives contiennent aussi les gènes codant des enzymes nommées Cas, et notamment Cas9.

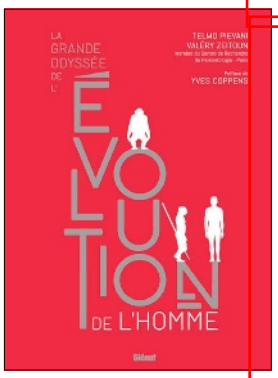
Le système CRISPR est mobilisé lorsqu'un virus se présente à nouveau: son génome, l'ADN viral, sera découpé en un point précis. Mais il lui faut un guide! Il fut découvert en 2011 par Emmanuelle Charpentier, aujourd'hui à l'institut Max-Planck de biologie des infections, à Berlin, en Allemagne. Avec son équipe, elle a montré qu'un petit ARN spécifique nommé «tracr» est nécessaire à l'enzyme Cas9. Ainsi, trois ingrédients étaient nécessaires pour couper l'ADN: l'enzyme Cas9 et deux petits ARN, tracr d'une part et la copie transcrite en ARN du fragment d'ADN cible d'autre part.

Grâce à une collaboration avec Jennifer Doudna, de l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis, la liste fut réduite à deux composants, la biochimiste américaine étant parvenue à fusionner les deux ARN. C'est ainsi que la communauté des généticiens a pu disposer de ciseaux à ADN précis, rapides et faciles à adapter à toute cible. Les applications sont vite apparues, notamment en agronomie et en médecine. ■

L. M.

https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/

© E. Charpentier/Wikimedia commons/The Royal Society/Duncan.Hull (CC BY-SA 3.0)



ETHNOLOGIE

AMAZONIE. L'ESPRIT DES PEUPLES DU XINGU

Sue et Patrick Cunningham

Delachaux & Niestlé, 2020
228 pages, 39,90 euros

Dans ces temps ardents, c'est un devoir de marteler que l'Amazonie brûle, emportant notre futur dans ses volutes de fumée. Le livre du couple de photographes Cunningham rappelle qu'outre la forêt, ce sont également de brillantes civilisations plurimillénaires qui sont menacées. Compagnons de la première heure des combats du chanteur Sting et du cacique Raoni – ce dernier omniprésent dans la publication –, voilà trente ans qu'ils arpentent les layons et sillonnent les rivières tropicales. C'est dire si leur expérience est riche.

Ils s'intéressent dans cet ouvrage aux habitants du Xingu, affluent méridional de l'Amazone au cœur du Brésil, figures emblématiques de la grande sylve. Des dizaines d'ethnies variées se côtoient le long des quelque 2260 kilomètres de la rivière, représentant la grande diversité culturelle amérindienne caractéristique de l'Amazonie.

Les auteurs évitent habilement le poncif récurrent de réduire ces groupes aux seules plumes ou arcs et flèches pour entrer plutôt dans leur intimité. Dans leur texte, ils abordent ainsi des thèmes moins triviaux comme le contexte historique et politique, la vie des communautés, les cérémonies et célébrations, les interactions négatives et positives, etc. Ce faisant, ils nourrissent originalement l'esprit du lecteur, tout en le régalant de leurs superbes photographies. Un livre utile donc, mais aussi un très bel objet. Il a également le mérite de maintenir notre conscience alerte sur la tragédie amazonienne actuelle. À 90 ans, le chef Raoni a vaillamment survécu en août 2020 à une attaque du Covid-19; espérons que son peuple résistera aussi bien au fatal virus que la société industrielle porte en elle.

STÉPHEN ROSTAIN
ARCHÉOLOGUE AU CNRS, À L'UNITÉ ARCHAM

PALÉOANTHROPOLOGIE

LA GRANDE ODYSSÉE DE L'ÉVOLUTION DE L'HOMME

Telmo Pievani et Valéry Zeitoun

Glénat, 2020
192 pages, 30 euros

Ce beau livre raconte un long voyage, celui des humains. Il prend d'ailleurs largement l'aspect d'un atlas, dont les nombreuses cartes et diagrammes permettent de se représenter facilement les étapes de l'évolution humaine. L'aventure commence avec de très anciens homininés en Afrique et se poursuit jusqu'à nos jours, avec l'expansion d'*Homo sapiens* jusqu'aux «bouts du monde».

Une aventure loin d'être simple et linéaire. Les humains sont de grands voyageurs, et le fait qu'il en ait existé plusieurs espèces (*H. sapiens*, Néandertaliens, Dénisoviens...) aux mêmes époques complique encore le tableau. Cette longue évolution s'inscrit en outre dans le cadre géologique et climatique du Pléistocène, qui se caractérise par une grande instabilité. Aux cycles glaciaires et interglaciaires s'ajoutent d'ailleurs des événements plus exceptionnels et plus soudains, comme l'éruption du volcan Toba, en Indonésie, il y a 75 500 ans, qui semble avoir eu des effets dévastateurs au moins sur le pourtour de l'océan Indien.

L'un des points forts de ce livre est de prendre en compte ces facteurs souvent négligés et néanmoins importants pour l'histoire de l'humanité. Parallèlement, les humains ont exercé une influence croissante sur leur environnement, comme en témoigne la disparition de nombreuses espèces animales consécutive à leur arrivée dans de nouveaux territoires. Et un facteur essentiel s'ajoute à ces aspects environnementaux: l'évolution culturelle, largement évoquée dans ses aspects les plus divers, de la naissance de l'art au développement (et parfois à l'extinction) des langues.

Ce livre aux magnifiques illustrations, qui ont en plus le mérite d'éviter la répétition d'images trop souvent déjà vues, constitue donc une excellente synthèse, à la fois originale et accessible, sur un sujet qui nous concerne tous, celui de nos origines.

ERIC BUFFETAUT
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE, ENS/CNRS, PARIS

ÉCOLOGIE-PROSPECTIVE

HUMANITÉ BIO-INSPIRÉE

Gauthier Chapelle
et Kalina Raskin (dir.)
Cherche Midi, 2020
144 pages, 24,90 euros

Ce beau livre est le catalogue de l'exposition *Bio-inspirée* à la Cité des sciences. Ses auteurs y proposent de dépasser la civilisation thermo-industrielle pour se rapprocher d'une civilisation plus résiliente, parce que bâtie à partir des principes fondamentaux régissant le vivant.

Il ne s'agit en aucun cas d'un simple catalogue, mais bien d'une œuvre. Avec Léonard de Vinci ou Jean-Jacques Rousseau pour figures tutélaires, elle se lit d'une traite ou par étapes, au choix. Chacun des sept chapitres vertébraux – Biodiversité, Agriculture, Matériaux, Énergie, Information, Économie et Éthique – est orné d'une incise originale rédigée par un auteur différent. Les objets abordés sont de plus en plus complexes à mesure que l'on avance dans le livre et, partant, de plus en plus propices à la discussion contradictoire. Pour leur part, les deux coordinateurs ont écrit l'introduction-manifeste et le chapitre de clôture-verdict.

Les textes érudits, mais toujours lisibles, et les images sont les deux moyens employés pour traduire une grande ambition: allier la raison et la passion sensible au service d'une nouvelle alliance avec notre environnement vivant. Nul besoin de culture scientifique pour suivre le chemin tracé par les chapitres thématiques : lorsqu'ils entraînent les lecteurs dans leurs pérégrinations intellectuelles, les auteurs n'en appellent qu'à la curiosité.

Cette méthode allie épaisseur et diversité dans le propos. Comme souvent pour les ouvrages sur ce thème, l'iconographie est riche et propice à l'émerveillement (doubles pages) ou à la réflexion (bichromes parsemés).

Au total, un bel objet pérenne, à qui l'on souhaite, comme à l'exposition, le plus grand public possible. Notre avenir le vaut bien...

YVAN RAHBÉ
DIRECTEUR DE RECHERCHE À L'INRAE

PHYSIQUE-MÉDECINE

QUAND LA PHYSIQUE SOIGNE

Cédric Ray et Jean-Claude Poizat
Belin, 2020
144 pages, 23 euros

Deux physiciens lyonnais passent ici en revue les différents dispositifs techniques utilisés lors des examens médicaux ou des hospitalisations. Ils nous décrivent en détail les principes physiques sous-jacents, ce qui leur offre notamment l'occasion d'expliciter les sigles quelque peu mystérieux tels que IRM, PET-scan, etc.

Ils commencent ainsi par traiter la question du diagnostic médical. Cela les amène à détailler les différents types d'imageries médicales et à évoquer les progrès réalisés dans ces techniques de diagnostic, leurs avantages et leurs limites. Puis ils évoquent les traitements médicaux effectués à l'aide de machines à travers des exemples d'applications provenant de divers domaines de la physique: optique, électronique, mécanique...

L'un des côtés agréables et utiles de l'ouvrage est que chaque chapitre peut être lu séparément. Décrits de façon simple, les concepts sont accompagnés d'illustrations et enrichis de belles images. Des encadrés détaillent certains termes scientifiques ou présentent des analogies intéressantes.

Le soin apporté à cet ouvrage s'exprime tant dans le choix des exemples que dans celui des illustrations et de la clarté de la mise en page. Il met en valeur la grande maîtrise des sujets abordés par les auteurs. Enseignants expérimentés en milieu médical, ces derniers savent parfaitement faire passer leurs messages sans équations. Une bibliographie soignée complète chaque chapitre.

Ce livre intéressera non seulement les professionnels de la santé, les étudiants en médecine et les physiciens, mais aussi tous ceux qui veulent en savoir plus sur les impressionnants dispositifs employés aujourd'hui pour soigner. On peut en particulier le conseiller à tous les patients qui se posent de nombreuses questions avant de se soumettre à un examen médical ou de recevoir des soins.

DOMINIQUE BERNARD
PROFESSEUR ÉMÉRITE DE PHYSIQUE
À L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

ET AUSSI

CHASSEURS D'ORAGE

Dean Gill
Salamandre, 2020
200 pages, 39 euros

Plus que spectaculaires, magnifiquement mises en couleurs, les images saisissantes d'orages et autres tempêtes se suivent et ne se ressemblent pas au fil des pages de cette œuvre. Son auteur, météorologue chez Météo Suisse, a traqué des événements orageux remarquables dans le monde entier. Il les explique scientifiquement et très clairement, et détaille avec poésie chaque moment rare saisi. Comme si l'on y était !

L'ESPACE

Nicolas Martin, avec Matthieu Lefrançois
E/P/A-France Culture, 2020
160 pages, 24,95 pages

L'animateur de l'émission *La Méthode scientifique* sur France Culture s'est associé avec cinq de nos éminents astrophysiciens et cosmologistes pour décrire de façon simple ce que nous savons et pouvons penser de l'Univers. Y sommes-nous seuls ? Pourrons-nous coloniser une autre planète ? Quelle est la structure de l'Univers ? Qu'est-ce que le Big Bang ? Les trous noirs ? Tous les textes ont la clarté et la fiabilité que peut atteindre un journaliste qui dialogue avec des chercheurs et leur fait valider chacune de ses lignes. Les images illustrent très bien chacun des mille sujets abordés.

LA BELLE HISTOIRE DES MERVEILLES DE LA TERRE

Gilles Chazot
De Bœck, 2020
320 pages, 29,90 euros

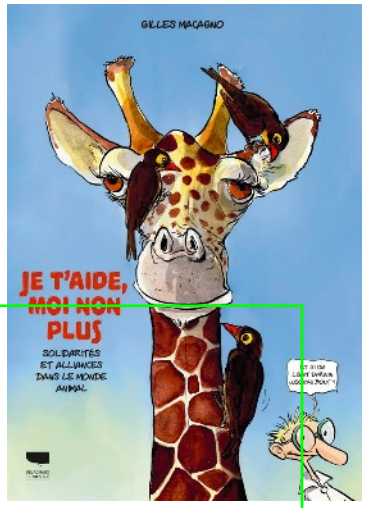
Plus d'une centaine de structures géologiques remarquables et magnifiques sont présentées ici. Elles sont si éclectiques que la seule histoire qui pouvait se tenir pour les ordonner est... celle de notre planète. L'auteur, professeur de géologie à l'université de Brest, évoque par exemple la Terre primitive par dix sujets, dont les gneiss âgés de 4,03 milliards d'années d'Acasta au Canada, les plus anciennes roches connues, etc. S'enchaînent ensuite les sujets couvrant le Paléozoïque, le Mésozoïque, le Cénozoïque, le Quaternaire et... l'époque actuelle. Plus une ère est récente, plus ils sont nombreux.De très belles images les illustrent.

DE 10 À 100 ANS

JE T'AIDE, MOI NON PLUS SOLIDARITÉS ET ALLIANCES DANS LE MONDE ANIMAL

Gilles Macagno

Delachaux & Niestlé, 2020
128 pages, 15,90 euros



Non, l'histoire de la vie sur Terre ne rime pas uniquement avec invasions, prédations et compétitions. Parmi les moteurs de l'évolution, on trouve aussi l'entraide, le mutualisme, la symbiose… Moult exemples à l'appui, voilà ce qu'explique au lecteur le Professeur Noyau assisté de ses deux comparses: le naturaliste anarchiste Pierre Kropotkine, pour l'occasion sorti des oubliettes de l'histoire des sciences, et Charles Darwin, père de la théorie de l'évolution, qui rappelle, non sans humeur, avoir défini le concept de sélection naturelle. À ne pas confondre avec la loi du plus fort, svp. Le Professeur Noyau, qui a fait sienne la devise de Gilles Macagno, «ce qui se conçoit gaiement s'apprend plus franchement», déroule sa leçon à l'aide de gnous mathématiciens, d'amibes communistes, de loups lecteurs de Lucky Luke ou de poissons-clowns admirateurs du Monde de Némo. Une bien drôle et efficace façon de faire connaître la théorie de l'évolution aux jeunes (et aux moins jeunes). ■

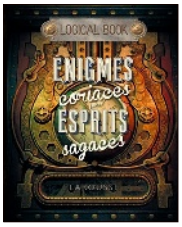
À PARTIR DE 13 ANS

ÉNIGMES CORIACES POUR ESPRITS SAGACES

Jack Guichard
et Florence Guichard

Larousse, 2020
128 pages, 14,90 euros

Savez-vous quelle question poser à une voyante pour lui prouver qu'elle ne peut pas répondre à une question concernant le futur? La réponse est dans ce livre, où sont proposés 131 autres énigmes, casse-tête et divers jeux de logique qui feront les délices des amateurs de devinettes et entraîneront, mine de rien, leurs capacités de raisonnement mathématique. ■



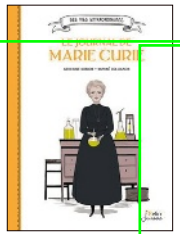
DÈS 9 ANS

LE JOURNAL DE MARIE CURIE

Gertrude Dordor
Ill. : Daphné Collignon

Belin Jeunesse, 2020
80 pages, 13,90 euros

Édifiante, la vie de Marie Curie? Oui. Et alors? On ne se lasse pas du récit de son extraordinaire parcours depuis sa jeunesse difficile et laborieuse en Pologne jusqu'à Paris, où sa passion pour les sciences et ses travaux sur la radioactivité lui valurent deux prix Nobel (celui de physique en 1903 et celui de chimie en 1911), un exploit qui ne sera jamais égalé. Si l'histoire, joliment romancée ici, de sa ténacité, de son intelligence et de son courage peut susciter quelques vocations, on ne s'en plaindra pas. ■



À PARTIR DE 12 ANS

THE GAME LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE EXPLIQUÉE AUX ADOS

Alessandro Baricco
et Sara Beltrame
Ill. : Tommaso Vidus Rosin

Gallimard Jeunesse, 2020
128 pages, 16,90 euros

L'écrivain italien Alessandro Baricco, connu des adultes comme auteur de romans (*Sans sang*, *Soie*…), a publié un essai sur l'épopée du numérique, *The Game* (paru en français en 2019). En voici une version passionnante destinée aux adolescents pour leur raconter la genèse du monde où ils sont nés, que l'on pourrait faire commencer le 12 août 1981 avec l'annonce officielle du premier PC. La connaître leur permettra peut-être de réfléchir intelligemment aux dérives possibles. ■

POUR TOUTE LA FAMILLE

LA MAGIE DE LA CONCENTRATION

Jean-Philippe Lachaux

Odile Jacob, 21,90
352 pages, 21,90 euros

Est-ce vraiment un cadeau de Noël, demanderez-vous, un livre de 352 pages sur la concentration? Certainement. Car ce livre, fruit des travaux de Jean-Philippe Lachaux, chercheur à l'Inserm, sur l'attention donne les clés pour permettre à chacun de décider par lui-même à quoi il consacre son «temps de cerveau disponible». Et cette promesse formidablement utile et tenue vaut bien le temps consacré à lire en famille ce long mais captivant dialogue entre le chercheur et le jeune Anatole, qui n'a pas la langue dans sa poche. ■

7 ANS ET AU-DELÀ

FORÊTS ... ET COMMENT LES PRÉSERVER

Amandine Thomas

Sarbacane, 2020
40 pages, 16,90 euros

Comprendre ce qu'est la photosynthèse, la canopée, l'humus... en découvrant des forêts du monde entier (Chine, Australie, Canada...) et les animaux qu'elles abritent, du panda, qui mange 40 kilogrammes de bambou par jour, à l'okapi, dont la langue mesure 50 centimètres, en passant par la fourmi parasol. Au passage, des conseils sur les gestes simples, à portée de l'enfant, pour participer à la préservation des forêts. ■

DÈS 5 ANS

LE KIDIDOC DE L'ESPACE

Sylvie Baussier
et Michel Viso
Ill. : Didier Balicevic

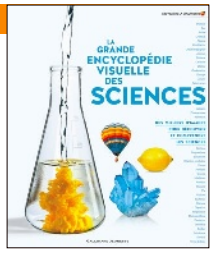
Nathan, 2020
36 pages, 16,95 euros

La collection kididoc est connue pour la qualité de ses pop-up, tirettes et autres flaps qui assurent le succès de ces livres-objets auprès des enfants. Ce nouvel opus consacré à l'espace fera découvrir aux petits les planètes du Système solaire, pourquoi on voit toujours la même face de la Lune ou à quoi ressemblent les autres galaxies. Il répondra aussi à des questions autrement cruciales comme: y a-t-il des toilettes dans la *Station spatiale*? Comment sont habillés les astronautes sous leur combinaison? Ou que mange-t-on dans l'espace? ■

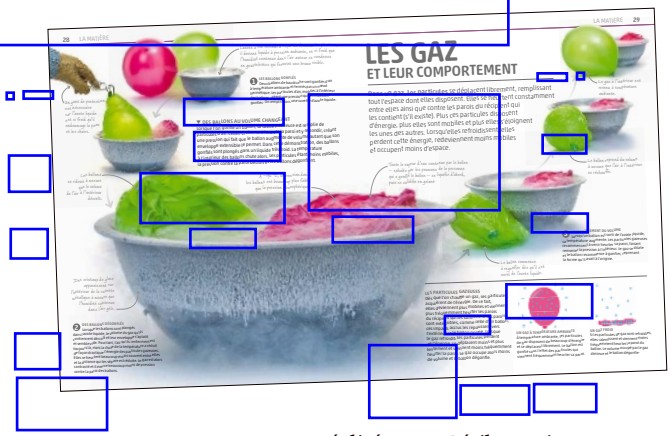
DÈS LE COLLÈGE

LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE VISUELLE DES SCIENCES

Gallimard Jeunesse, 2020
320 pages, 24,95 euros

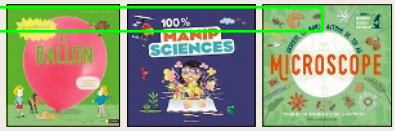


Le sous-titre – des milliers d'images pour découvrir et comprendre les sciences – résume le projet du livre: montrer la science en action, donner le goût du savoir et de l'expérimentation grâce à de très belles images. Tous les domaines sont représentés (physique, chimie, biologie, géologie...) et le pari est réussi. ■



Pages réalisées par Cécile Lestienne

SPÉCIAL LIVRES D'EXPÉRIENCES



LA SCIENCE EST DANS LE BALLON

Cécile Jugla et Jack Guichard
Ill. : Laurent Simon

Nathan, 2020
30 pages, 7,95 euros

Du matériel facile à trouver à la maison : un paquet de ballons, une bougie, un citron, du savon, un sèche-cheveux... et voilà dix expériences amusantes à réaliser avec les enfants dès 4 ans : perce ton ballon sans qu'il éclate ; fabrique un ballon à réaction ; fais chanter ton ballon ; gonfle ton ballon sans souffler dedans... De quoi bien s'amuser en apprenant au passage ce qu'est un son ou l'électricité statique.

100 % MANIP SCIENCES

Marc Beynié
Ill. : Philippe Derrien et Dume

Bayard Jeunesse, 2020
64 pages, 13,90 euros

Pour les plus grands, à partir de 7 ans, voici un livre adapté de la rubrique « Manip des sciences » du magazine *Images Doc*. Trente expériences très pédagogiques pour fabriquer un couteau en silex, et aussi un pet ; pour digérer comme un dinosaure, élever des vers de terre, observer le Soleil sans danger et même reproduire le choc des continents. Le temps de préparation et la durée de l'expérience sont toujours indiqués, histoire d'éviter les mauvaises surprises aux parents aidants.

OBSERVE LE MONDE AUTOUR DE TOI AU MICROSCOPE

Tom Jackson

Gallimard Jeunesse, 2020
48 pages, 24,95 euros

Ce coffret contient le matériel pour construire un microscope en carton. Avec un mode d'emploi beaucoup plus détaillé qu'une notice de montage Ikea, pour permettre à l'adulte accompagnateur de guider l'enfant (à partir de 8 ans) dans la fabrication sans s'arracher les cheveux (ou pas trop). Le guide d'observation donne ensuite une foultitude d'idées d'objets à découvrir autrement : les écailles des cheveux, les fibres du papier, les couleurs des grains de sable, les vaisseaux des carottes ou encore les croûtes lorsque l'on s'est écorché les genoux. Fascinant !

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LES SCIENCES NOUS RENDENT-ELLES CRÉDULES ?

Les outils intellectuels nécessaires à la recherche peuvent parfois se retourner contre nous et nous amener à défendre des théories fausses.

À contre-courant de la majorité, Copernic affirmait que la Terre n'est pas au centre de l'Univers. Comment distinguer le penseur égaré du génie ?

La culture scientifique est un bon outil pour nous protéger contre le déferlement d'infox, de bobards et de *fake news* dont nous sommes les victimes. Les sciences nous apprennent, en effet, que chaque affirmation doit être justifiée par une démonstration, un calcul, une observation ou une expérience. Elles nous apprennent à suspendre notre jugement, parfois pendant des siècles, tant qu'une telle justification n'a pas été trouvée. Elles nous apprennent, enfin, à nous méfier des arguments d'autorité : c'est sa justification, et non son auteur, qui témoigne de la vérité d'une affirmation.

Ce bouclier semble pourtant parfois peu efficace. Ainsi, au XIXe siècle, le mathématicien Michel Chasles, à la naïveté déconcertante, a acheté à un faussaire plusieurs milliers de lettres manuscrites prétendument écrites par Pythagore, Alexandre, Galilée, Pascal, etc. Plus proche de nous, des médecins, que leur culture scientifique aurait dû rendre plus prudents, ont parfois relayé des infox sur le Covid-19. Au-delà de la crédulité, l'histoire ne manque pas de scientifiques, parfois talentueux, qui, à un moment de leur vie, se sont mis à défendre des théories, sans justification aucune.

Bien entendu, les chercheurs ne sont pas des êtres de pure raison et, comme tous les êtres humains, ils peuvent être leurrés par leur intérêt, leur ambition, leur nationalisme, etc. Mais dépassons cette évidence. Et si leur pratique scientifique elle-même les avait menés sur les chemins de la crédulité ?

> La science nous apprend la prudence, mais aussi l'audace

La pratique des sciences nous demande, en effet, de nous méfier de notre sens. En apprenant qu'il y a autant de nombres pairs que de nombres entiers, qu'il existe des nombres dont le carré est négatif ou qu'un photon, traversant un écran percé de deux fentes, peut passer par les deux fentes à la fois, nous prenons l'habitude d'apprivoiser des idées qui défient le sens commun. La science nous apprend donc la prudence, mais aussi l'audace. Et il est dans la nature même de la démarche scientifique d'examiner des hypothèses audacieuses, telle celle où une molécule est un remède inespéré contre le Covid-19. Ce n'est que dans un second temps que la prudence nous incite à mettre ces idées à l'épreuve, de façon à les corroborer ou à les réfuter.

Mais il suffit d'un petit déséquilibre… Lorsque la pratique des sciences développe, chez une personne, l'audace un peu plus que la prudence, la machine s'emballe : cette personne peut se convaincre d'une théorie pourtant délirante, en devenir un farouche avocat et, rapidement, produire elle-même de nouvelles idées fausses. La communauté scientifique tentera, peut-être, de la ramener à la raison. Hélas, la fréquentation de Copernic, de Darwin ou de Turing l'aura persuadée qu'il est possible d'avoir raison seule contre tous et que l'opinion de la majorité n'a aucune valeur. N'est-ce pas elle, après tout, qui pensait que la Terre est au centre de l'Univers, que les espèces végétales et animales ne se transforment pas ou qu'une machine ne peut pas jouer aux échecs ?

Cette ambivalence est un élément important à prendre en compte quand nous enseignons les sciences. Quand nous disons à nos étudiants, sans justification parce que celle-ci est difficile, qu'un chat peut être à la fois mort et vivant ou qu'un photon peut passer par deux fentes à la fois, nous les aidons certes à développer leur audace, mais non leur prudence.

Et audace sans prudence n'est que ruine de l'âme. ■

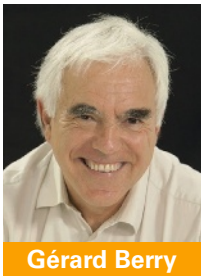
GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria, enseignant à l'École normale supérieure de Paris-Saclay et membre du Comité national pilote d'éthique du numérique.

© Shutterstock.com/dmitry_islentev

J.-P. Delahaye

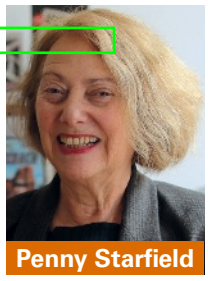
Ivar Ekeland

Nathalie Besson


Gérard Berry

Isabelle Drouet

Pierre Lemaitre

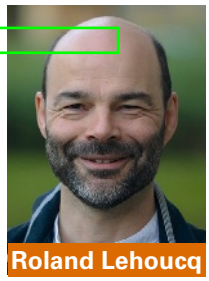

Penny Starfield

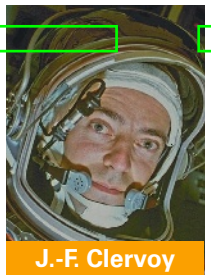
Etienne Klein

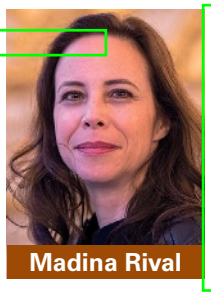
Time World 2021 PARIS

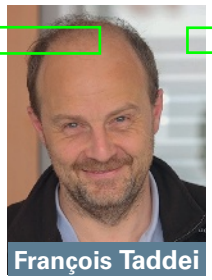
CONGRÈS SCIENTIFIQUE MONDIAL SUR LE HASARD

Stuart Vyse


Roland Lehoucq

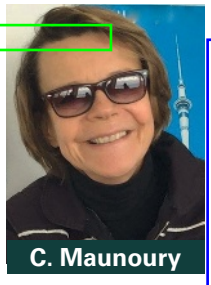

J.-F. Clervoy


Madina Rival


François Taddei

Juliette Mignot

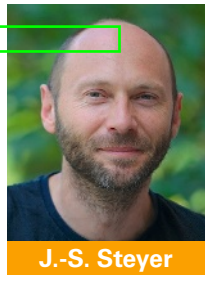
Philippe Charlier

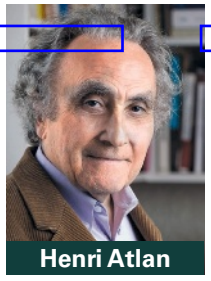

C. Maunoury

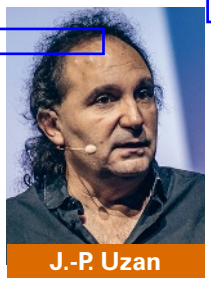
21, 22, 23 JANVIER

Conservatoire national des arts et métiers

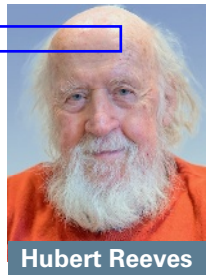
Kinga Morsanyi


J.-S. Steyer

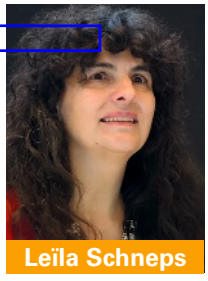

Henri Atlan


J.-P. Uzan

TIMEWORLDEVENT.COM


Hubert Reeves

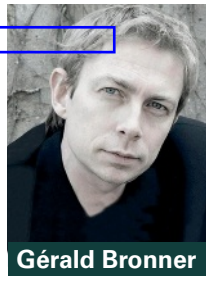
Roger Mansuy


Leïla Schneps

François Forget

90 CONFÉRENCES
6 TABLES RONDES
EXPOSITION
DÉDICACES
SPECTACLES

David Elbaz


Gérald Bronner

Sous le haut patronage

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
Liberté
Égalité
Fraternité

Soutenu par la chaîne YouTube

Ideas in science

En partenariat avec

POUR LA SCIENCE

Une coproduction

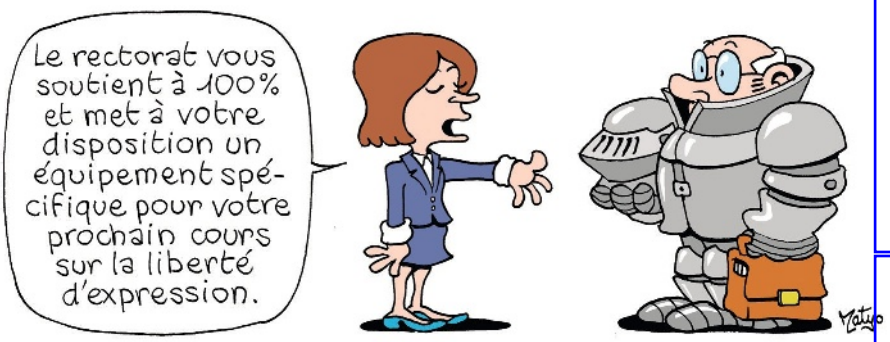
le cnam

Innovaxiom

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

COMBATTRE AVEC DES CARICATURES

Face aux menaces contre la liberté d'expression et la laïcité, l'attitude des enseignants dépend de l'organisation de leur établissement et de la confiance en leur hiérarchie.



L'insoutenable est arrivé le 16 octobre avec l'assassinat d'un professeur de collège dans les Yvelines par un fanatique. Samuel Paty fut victime auparavant d'une campagne de dénigrement sur Twitter pour avoir montré des caricatures de Mahomet à ses élèves, et sa décapitation fut également revendiquée sur ce réseau social.

L'histoire de la liberté d'expression face aux religions n'a jamais été un long fleuve tranquille, mais le combat ne se livre plus sur le seul terrain des valeurs. Depuis quinze ans, la prolifération des échanges en ligne a généralisé l'extraction de toute parole publique de son contexte. L'affaire Mila, du nom de l'adolescente ayant reçu plusieurs dizaines de milliers de menaces de mort pour avoir critiqué l'islam en janvier dernier sur Instagram, en est la parfaite illustration. Quels seront les effets de ce terrorisme sur le comportement des éducateurs?

Si plus personne ne doute que les réseaux sociaux sont une caisse de résonance du harcèlement, c'est surtout leur capacité à retirer les propos de leur contexte d'expression qui pose un redoutable défi démocratique. Outre la montée en épingle des dessins de *Charlie Hebdo* mettant en cause la liberté de conscience, le danger social d'une pression virale à la censure réside à la fois dans l'élargissement brutal de son public cible et la disparition des intermédiaires qui tempèrent les contenus. Avec le harcèlement en ligne de Samuel Paty, d'un problème propre à un établissement de l'Éducation nationale, on passe à un problème public qui touche les institutions et les valeurs fondamentales de la République.

> **Les enseignants seront davantage reconnus comme lanceurs d'alerte**

En première ligne, des professeurs chargés de l'enseignement moral et civique ont déjà eu à réclamer la protection de leur hiérarchie administrative. Le silence de certains services de l'État à tenir compte de ces signaux s'est répercuté sur le comportement de son personnel. Le socioéconomiste américain Albert Hirschman identifie en situation de crise trois formes possibles d'attachement de l'agent à son établissement : la défection (*exit*), la prise de parole (*voice*) ou le *statu quo* (*loyalty*). Certains enseignants évitent ainsi de recourir aux caricatures des religions; d'autres, au contraire, protestent contre la réprobation de parents d'élèves, quitte à devoir se justifier vis-à-vis de leur hiérarchie; d'autres encore, restant dévoués à l'institution, ne modifient rien à leur pratique bien qu'ils aient conscience des conditions difficiles de travail.

Ces trois attitudes coexistent dans un même corps professionnel, mais leur proportion dépend d'une *économie de la proximité*. Par exemple, les politiques managériales parvenant à créer un sentiment d'appartenance, comme on l'observe dans les «grandes écoles», favorisent l'expression active des employés sur le modèle du *voice*. En revanche, un établissement scolaire rongé par des problèmes d'insécurité encourage les attitudes d'*exit*, ou du #pasdevague, *hashtag* apparu à la suite du braquage d'un professeur en 2018. Loin de dépendre des seules valeurs, le rapport du corps enseignant à son administration est lié à des paramètres organisationnels.

Les actes de violence intérieure tels que l'assassinat par un islamiste de Samuel Paty déstabilisent en profondeur la confiance dans les organes d'État, qui n'est alors plus compensée par une économie de la proximité. Ce drame permet néanmoins aux enseignants d'acquérir un statut plus officiel de lanceurs d'alerte sur les obstacles rencontrés dans la formation à la laïcité. Instituer la liberté d'expression par la caricature en promouvant les *voice* suppose de réformer jusqu'à la salle de cours avec des leviers d'action pour le personnel exposé. On ne met pas fin à la terreur par de simples lois. ■

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

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL 1 AN

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre *Pourquoi le Soleil brille* de Roland Lehoucq (3793106 9)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~98,80 €~~	**79 €** Au lieu de ~~130,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~190,40 €~~
	40 % de réduction *	**39 %** de réduction *	**48 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

PAG20NOE

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

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

+ UN CADEAU

59€ Au lieu de ~~98,80€~~

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

+ UN CADEAU

79€ Au lieu de ~~130,40€~~

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

+ UN CADEAU

99€ Au lieu de ~~190,40€~~

P1A791EK2
P1A791EK9
P1A791EK11

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

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

☐ **Carte bancaire**

N° ....

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

Signature obligatoire :

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Pourquoi le Soleil brille* pour 16,00 €.

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

TROUS NOIRS
Comment résoudre le paradoxe de l'information ?

Alors que le prix Nobel de physique vient de récompenser trois spécialistes des trous noirs, ces étranges objets soulèvent encore d'importantes interrogations. En particulier, ils détruiraient l'information associée à la matière qu'ils engloutissent, ce qui serait contraire aux lois de la physique quantique. Un paradoxe que de nouvelles observations aideront à dissiper.

Pour la première fois, le 10 avril 2019, l'humanité a contemplé l'image d'un vrai trou noir. En utilisant un réseau de radiotélescopes terrestres fonctionnant de concert, l'équipe du programme *EHT* (*Event Horizon Telescope*) a construit un cliché du trou noir de 6,5 milliards de masses solaires tapi au centre de la galaxie voisine M87. C'est un exploit époustouflant : l'existence des trous noirs avait été prédite depuis longtemps, mais ces mystérieux objets n'avaient jamais été « observés » directement. Et cette performance ne se limite pas à l'obtention d'un cliché. Cette image et les observations à venir nous livreront des indices pour percer l'une des plus grandes énigmes des trous noirs et de toute la physique.

Cette énigme est un paradoxe qui porte sur le devenir de l'information dans un trou noir. >

L'ESSENTIEL

> Les trous noirs semblent détruire l'information qui y tombe, ce qui est en contradiction avec les principes de la mécanique quantique.

> Les scientifiques ont proposé diverses modifications de la description classique des trous noirs pour résoudre ce paradoxe, mais il leur manque des données pour les tester.

> Cependant, le programme *Event Horizon Telescope*, qui a publié en 2019 la première image d'un trou noir, et les interféromètres *Ligo* et *Virgo*, qui détectent des ondes gravitationnelles produites par les collisions de trous noirs, changeront bientôt la donne et fourniront des indices cruciaux.

L'AUTEUR

STEVEN GIDDINGS
physicien théoricien à l'université de Californie à Santa Barbara, aux États-Unis

À quoi ressemble vraiment un trou noir ? Sa description classique, donnée par la relativité générale, se heurte à certains principes fondamentaux de la mécanique quantique. En particulier, le devenir de l'information pose un sérieux problème.

© Mondolithic Studios (ouverture) ; © Sonia Fernandez (auteur)

> En étudiant cette question, les physiciens ont découvert que la simple existence des trous noirs est en contradiction avec les lois de la physique quantique, qui décrivent jusqu'à présent avec succès tout le reste de l'Univers. Pour résoudre ce paradoxe, il sera peut-être nécessaire d'opérer une révolution conceptuelle aussi profonde que celle qui a conduit à l'avènement de la mécanique quantique.

Les théoriciens ont exploré de nombreuses pistes, mais ils disposent de très peu d'indices directs pour les aider à résoudre ce problème. Cependant, la première image d'un trou noir marque le début d'une période captivante, qui voit arriver des données réelles pour guider nos idées. Les observations futures de l'*EHT*, en particulier celles susceptibles de montrer l'évolution des trous noirs au fil du temps, et les détections récentes de collisions de trous noirs grâce aux observatoires d'ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*, apporteront certainement des éclairages déterminants et ouvriront la voie à une nouvelle ère de la physique.

INFORMATION PERDUE OU CONSERVÉE ?

Les observations de l'*EHT* et les détections d'ondes gravitationnelles sont les preuves les plus récentes et les plus directes de l'existence des trous noirs. Cependant, ces objets sont en conflit avec les fondements actuels de la physique. Les principes de la physique quantique sont censés s'appliquer à tous les objets de la nature, mais quand on les utilise pour décrire les trous noirs, on se heurte à des contradictions, qui mettent en évidence un défaut de la forme actuelle de ces lois.

Le problème découle d'une des questions les plus simples que l'on puisse poser sur les trous noirs : qu'arrive-t-il à la matière qui tombe dedans ? Nous savons, d'après les lois actuelles de la physique quantique, que la matière et l'énergie peuvent changer de forme. Les particules peuvent, par exemple, se transformer en d'autres particules. Mais une chose est sacrée et n'est jamais détruite : l'information quantique, c'est-à-dire l'information sur l'état d'un système quantique. Si nous connaissons complètement l'état quantique d'un tel système, nous devrions toujours être en mesure de déterminer exactement son état passé ou futur sans perte d'information. Une question plus précise est donc : qu'arrive-t-il à l'information quantique qui tombe dans un trou noir ?

Notre compréhension des trous noirs vient de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, qui décrit la gravité comme une manifestation de la courbure de l'espace-temps ; on visualise souvent cette idée avec une balle déformant la surface d'un trampoline. La trajectoire des corps massifs et de la lumière s'incurve en suivant la déformation de l'espace-temps, et c'est cela qu'on nomme la « gravité ». Et si, dans un espace assez petit, on accumule assez de masse, la déformation de l'espace environnant est tellement forte que même la lumière ne peut pas s'échapper.

La région d'où il n'est plus possible, même pour la lumière, de fuir constitue un « trou noir ». Elle est délimitée par ce qu'on nomme l'« horizon des événements ». Si rien ne peut

Le réseau Event Horizon Telescope a construit la première image d'un trou noir réel

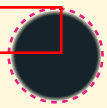
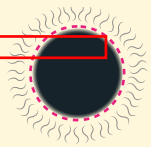
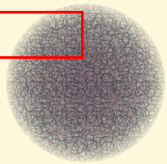
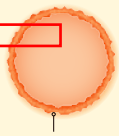
voyager plus vite que la lumière (y compris l'information), tout doit donc rester piégé à l'intérieur de cette frontière. Les trous noirs sont alors des gouffres cosmiques emprisonnant l'information au même titre que la lumière et la matière.

La situation s'est compliquée en 1974 quand le physicien britannique Stephen Hawking a prédit le phénomène d'évaporation des trous noirs. D'après la physique quantique, partout et tout le temps, il se crée des paires de « particules virtuelles », constituées d'une particule et de son antiparticule et qui, en général, s'annihilent très rapidement. Hawking a étudié les conséquences de ce phénomène près de l'horizon des événements : l'une des particules de la paire peut apparaître à l'intérieur de cette frontière, et l'autre à l'extérieur. La particule à l'extérieur peut s'éloigner du trou noir en emportant de l'énergie.

Pour un observateur à distance, le trou noir semble alors émettre un rayonnement, nommé « rayonnement de Hawking », et perdre de l'énergie. Il s'évapore progressivement suivant ce processus jusqu'à disparaître complètement. Or le rayonnement de Hawking ne contient aucune information liée à la matière qui a pénétré dans le trou noir. La conséquence problématique des travaux de Hawking revient à comprendre que l'information quantique qui tombe dans un trou noir ne s'en échappe pas et que, le trou noir finissant pourtant par disparaître, l'information est détruite. Un résultat en contradiction directe avec les principes de la physique quantique.

UN PROBLÈME POSÉ IL Y A PLUS DE QUARANTE ANS

La relativité générale prévoit l'existence des trous noirs, et de nombreuses observations tendent à confirmer la présence de ces objets dans l'Univers. Mais, en 1974, Stephen Hawking a avancé que ces objets s'évaporent. Si c'est le cas, tout ce qui tombe dedans est détruit, en particulier l'information rattachée à la matière engloutie. C'est un problème, car la physique quantique et la conservation de l'énergie interdisent toute destruction de l'information. Les physiciens ont proposé diverses solutions en modifiant notre vision du trou noir.

	HYPOTHÈSE	DESCRIPTION	PROBLÈME
L'information est détruite	TROU NOIR « CLASSIQUE »  Horizon des événements	Le trou noir a un horizon des événements ; l'information qui pénètre dans le trou noir est détruite quand le trou noir s'évapore.	Cette piste contredit la physique quantique et la conservation de l'énergie, qui impliquent que l'information ne peut être détruite.
L'information est conservée	CHEVEUX SOUPLES  Empreinte de l'information	L'information ne pénètre pas complètement dans le trou noir mais laisse une « empreinte » juste à l'extérieur de l'horizon des événements.	La plupart des spécialistes ne considèrent pas cette description comme une solution convaincante.
	PELOTE DUVETEUSE 	Dans ce type de vestige massif, l'horizon des événements est remplacé par des cordes dans une géométrie à grand nombre de dimensions.	Les trois scénarios ci-contre exigent une modification de la notion conventionnelle de localité, c'est-à-dire l'idée selon laquelle rien, y compris l'information, ne peut voyager plus vite que la lumière.
	MUR DE FEU  Mur de particules	Ce type de vestige massif présente un « mur » de particules de haute énergie qui remplace l'horizon ; il n'y a pas d'intérieur du trou noir.	
	HALO QUANTIQUE	Un trou noir quantique interagit avec son environnement par le biais de petites fluctuations de l'espace-temps. Ce mécanisme permet à l'information d'être transférée vers l'extérieur du trou noir.	

© Amanda Montañez (dessins)

Cette conclusion a déclenché une crise profonde en physique théorique. Or de telles crises ont souvent servi d'impulsion pour de grandes avancées. Par exemple, au début du XX^e siècle, la physique classique semblait prédire une inévitable instabilité des atomes, en contradiction évidente avec l'existence de la matière. Plus précisément, les électrons en orbite au sein des atomes, changeant constamment de direction, auraient dû émettre continûment de la lumière, ce qui aurait entraîné une perte d'énergie et leur chute en spirale sur le noyau. Ce problème a joué un rôle clé dans la révolution quantique. En 1913, Niels Bohr a suggéré que les électrons ne peuvent occuper que des orbites particulières et ne peuvent donc pas tomber en spirale. Cette idée radicale a contribué à poser les fondements de la mécanique quantique, à partir desquelles les physiciens ont réécrit les lois de la nature.

ALTERNATIVES QUANTIQUES

La crise des trous noirs conduit de la même façon à un nouveau changement de paradigme en physique. Quand Hawking a découvert que les trous noirs s'évaporent, il a initialement conclu que la mécanique quantique devait être erronée et que la destruction de l'information était autorisée. Mais les physiciens ont rapidement compris que ce changement conduirait à une violation majeure du principe de conservation de l'énergie, ce qui invaliderait notre description actuelle de l'Univers. Il fallait clairement chercher la solution ailleurs. Et d'autres arguments théoriques ont renforcé la conviction que l'information est toujours conservée.

Une autre idée, au début, était que les trous noirs ne s'évaporent pas complètement, mais cessent de rétrécir quand ils atteignent une taille minuscule, laissant derrière eux des vestiges microscopiques contenant l'information d'origine. Mais les scientifiques ont remarqué que dans ce cas, d'après la physique quantique, la matière ordinaire deviendrait très instable et exploserait en vestiges de ce type, là encore en contradiction avec notre expérience quotidienne.

Il est tentant de penser que la conclusion initiale de Hawking est probablement fausse et que l'information conservée s'échappe bien du trou noir. Mais cette solution naïve se heurte au principe de localité selon lequel aucune information ne peut se déplacer d'un point à un autre plus vite que la lumière. Or pour échapper à un trou noir, il faudrait voyager plus vite que la lumière. Un excès de vitesse clairement problématique. Depuis la découverte de Hawking, les physiciens ont tenté de trouver une porte de sortie à ce paradoxe tout en restant dans le cadre de la physique conventionnelle. Sans succès jusqu'à présent.

En 2016, Hawking lui-même, Malcolm Perry, de l'université Queen Mary, à Londres, >

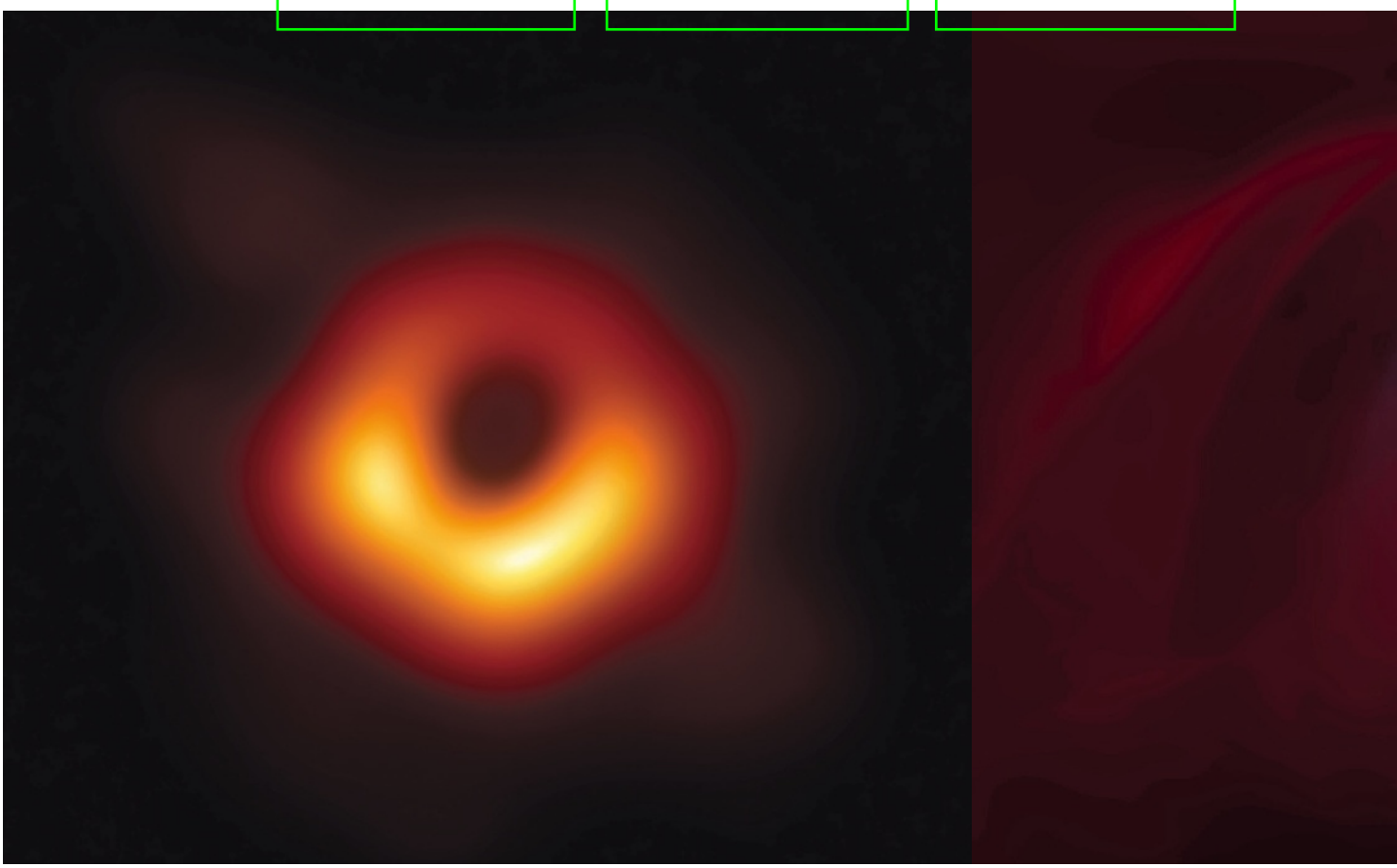
> et Andrew Strominger, de l'université Harvard, ont fait une proposition qui a retenu l'attention des spécialistes. Ils ont suggéré qu'une erreur s'était glissée dans l'analyse initiale : l'information n'entrerait en fait jamais vraiment dans le trou noir, mais laisserait une sorte d'empreinte à l'extérieur, sous la forme de « cheveux souples » (cette expression fait référence au théorème affirmant qu'« un trou noir n'a pas de cheveux », un tel objet étant défini par seulement trois grandeurs : sa masse, sa charge électrique et son moment cinétique). Mais une analyse plus approfondie de cette idée montre qu'elle est problématique et la plupart des chercheurs n'y croient plus. Pour résumer, une nouvelle approche plus radicale semble nécessaire.

Une autre piste consiste à envisager que des lois physiques inconnues empêchent la formation de véritables trous noirs. Ces derniers résultent en général de l'effondrement de très grosses étoiles en fin de vie qui ont épuisé leur combustible. Sous l'effet de sa propre gravité, la masse stellaire se concentre en son cœur et donne naissance à un trou noir. Et si cependant ce stade n'était jamais atteint et la mort d'une étoile produisait d'autres objets ayant un « meilleur » comportement ?

Par exemple, des étoiles plus légères, comme le Soleil, finissent leur vie sous la forme de vestiges denses tels que des naines blanches ou des étoiles à neutrons, mais jamais en trous noirs. Il se pourrait qu'un phénomène inconnu empêche aussi les étoiles plus grosses de former

LA PREMIÈRE IMAGE D'UN TROU NOIR

En 2019, l'équipe de l'*Event Horizon Telescope* (une installation virtuelle reposant sur plusieurs radiotélescopes à travers le monde qui synchronisent leurs observations) a réalisé l'image du trou noir supermassif au centre de la galaxie M87 *(à gauche)*. Il s'agit plus précisément de son ombre, la lumière étant celle émise par la matière très chaude de son disque d'accrétion. Les équations de la relativité générale permettent de prédire la forme précise de cette ombre. On peut donc utiliser cette image pour tester cette théorie et peut-être mettre en évidence certaines anomalies. L'image s'est révélée compatible avec la relativité générale. Dans une nouvelle étude, l'équipe a adopté la stratégie inverse : elle a considéré une grande variété de théories modifiant la relativité générale et a regardé si les prédictions simulées *(à droite)* sont compatibles avec l'image réelle. Cette étude met des contraintes 500 fois plus sévères sur ces modèles que les précédents travaux utilisant des observations portant sur le Système solaire.



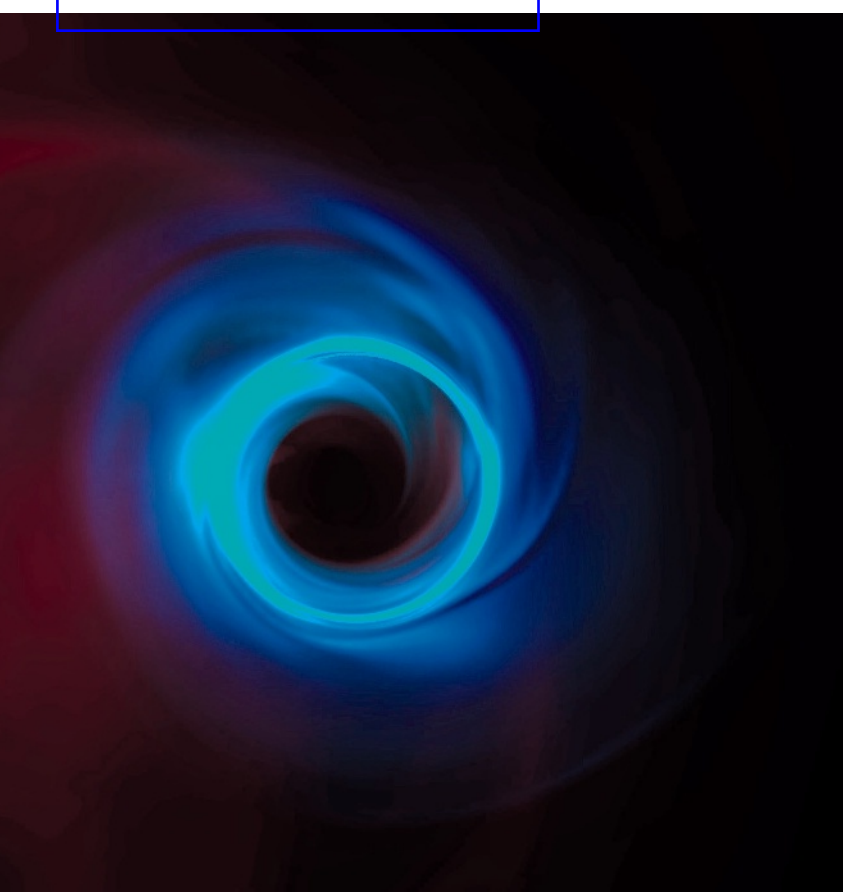
© Collaboration EHT, L. Medeiros, C. Chan, D. Psaltis, F. Özel, université de l'Arizona, Institut des études avancées de Princeton

des trous noirs et les conduise à produire une sorte de «vestige massif», quelque chose qui ressemblerait davantage à une étoile à neutrons qu'à un trou noir.

L'inconvénient de cette proposition est que nous ne savons pas expliquer pourquoi ces objets seraient stables: aucune loi connue de la physique n'empêcherait la poursuite de l'effondrement sous l'effet de la gravité, et toute tentative d'explication physique suppose une transmission superluminique de signaux d'un côté à l'autre de la matière qui s'effondre.

Malgré les problèmes de ce genre de scénarios, les physiciens en ont exploré différentes versions. Par exemple, en 2003, Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, a avancé une idée fondée sur la théorie des cordes (où les particules fondamentales sont décrites par de minuscules cordes).

Son idée est qu'un trou noir se transforme en «pelote duveteuse» (*fuzzball*), une sorte de vestige massif, ou même qu'une telle pelote duveteuse se forme dès le départ à la place d'un trou noir. Grâce à la physique de la théorie des cordes qui fait intervenir plus de dimensions que les quatre habituelles de l'espace-temps, les pelotes duveteuses auraient une géométrie complexe de plus grande dimensionnalité; au lieu de la frontière nette et lisse d'un trou noir au niveau de l'horizon des événements, une pelote duveteuse aurait une frontière plus floue et étendue.



Une version plus récente du scénario de vestige est l'idée selon laquelle l'horizon du trou noir est remplacé par un «mur de feu» (*firewall*) constitué de particules de haute énergie. Ce mur de feu incinérerait tout ce qui arrive dessus et le transformerait en énergie pure (*voir l'encadré page 27*). Mais la pelote duveteuse et le mur de feu ont deux problèmes en commun: ils supposent une violation de la localité, et les objets en résultant auraient des propriétés très difficiles à expliquer.

MODIFIER LA LOCALITÉ

Ces différentes pistes semblent toutes sauver l'information au détriment du principe de localité. Mais si l'on fait cela sans précaution, on est conduit typiquement à un autre paradoxe lié à la causalité: avec un signal superluminique, dans un espace vide et plat, une personne peut envoyer un message dans le passé. Mais si ce message déclenche la mort de son grand-père avant la naissance de son père, comment cette personne pourrait-elle être née pour envoyer le message?

La question est donc de savoir s'il est possible de modifier le principe de localité de façon subtile sans faire apparaître de paradoxes. Est-il possible par exemple de «délocaliser» l'information? Ce mécanisme pourrait apparaître de façon très naturelle dans la théorie qui unifiera la physique quantique et la relativité générale, l'un des problèmes les plus difficiles de la physique actuelle. Et nous avons d'autres raisons de penser qu'une telle subtilité existe. L'idée même d'information localisée (le fait qu'elle puisse exister à un endroit et pas à un autre) est plus délicate à définir dans les théories qui incluent la gravité que dans celles qui ne le font pas, parce que les champs gravitationnels s'étendent à l'infini, ce qui complique le concept de localisation.

La formation de vestiges massifs semble être une réponse trop radicale au problème de l'information qui s'échappe d'un trou noir. D'ailleurs, il s'accumule de nombreuses preuves que des objets dans l'Univers ont bien l'apparence et le comportement des trous noirs classiques, tels qu'ils sont décrits par la théorie d'Einstein. Il faut donc chercher des effets faibles (et donc passés inaperçus jusqu'à présent) qui n'altèrent pas notre vision de l'espace-temps, mais qui assureraient la délocalisation de l'information et lui permettraient de s'échapper des trous noirs.

Récemment, j'ai proposé deux versions d'un possible mécanisme de ce type. Dans le premier, la géométrie de l'espace-temps près d'un trou noir est modifiée. Elle se courbe et ondule d'une façon qui dépend de l'information dans le trou noir, mais doucement, de telle >

> sorte que cela ne détruit pas, par exemple, un astronaute qui traverserait la région où se trouverait normalement l'horizon des événements. Dans ce scénario « non violent fort », ces fluctuations de l'espace-temps transfèrent de l'information vers l'extérieur.

L'espace-temps émergerait d'une structure plus fondamentale

En outre, j'ai remarqué que l'information peut aussi s'échapper d'une façon intrinsèquement quantique, plus subtile. Dans le scénario « non violent faible », même de minuscules fluctuations quantiques de la géométrie de l'espace-temps à proximité du trou noir peuvent transférer de l'information à des particules émanant du trou noir. Dans les deux cas, le trou noir se trouve entouré d'un « halo quantique », où les interactions restituent l'information à son environnement, ce qui permet de sauver les principes de conservation de la mécanique quantique.

De façon étonnante, ces scénarios, bien qu'ils semblent nécessiter une propagation superluminique de l'information, ne conduisent pas nécessairement au paradoxe du grand-père. Les deux phénomènes se manifestent seulement à proximité du trou noir, où la géométrie spatio-temporelle est courbe et donc différente de celle d'un espace plat, la configuration qui permet la communication avec le passé (en toute rigueur, elle est possible en espace-temps courbe, mais dans des situations extrêmes et peu naturelles). Autre conséquence intéressante de ces scénarios, ils suggèrent que le principe de localité est à revoir dans sa formulation actuelle.

RÉÉCRIRE LES LOIS DE LA PHYSIQUE

Jusqu'à présent, le scénario de halo quantique n'a pas été formulé dans le cadre d'une théorie complète de la physique qui réconcilierait la mécanique quantique et la relativité générale. Si un tel scénario est correct, il est peut-être la manifestation de la nature plus profonde du monde. Nos notions mêmes d'espace et de temps, qui sous-tendent le reste de la science, auront alors besoin d'une refonte importante.

Les travaux théoriques actuels pour comprendre les trous noirs rappellent les premières tentatives de modélisation de la physique de l'atome par Bohr et d'autres. Leurs descriptions de l'atome étaient approximatives et ce n'est que plus tard qu'elles ont débouché sur la structure théorique profonde de la mécanique quantique. Bien qu'il puisse sembler fou de vouloir modifier la localité, nous pouvons nous rassurer en notant que la mécanique quantique avait tout d'une idée folle pour les physiciens de l'époque aux prises avec leurs découvertes.

Étant donné le défi immense que constitue la conception des trous noirs quantiques et de la théorie plus complète qui les décrit, les physiciens ont hâte de disposer d'indices expérimentaux et observationnels pour les guider. Les passionnantes avancées récentes ont ouvert pour l'humanité deux fenêtres observationnelles directes sur le comportement des trous noirs. En plus des images de trous noirs du réseau *EHT* de radiotélescopes, les observatoires *Ligo* et *Virgo* ont commencé à détecter des ondes gravitationnelles issues de collisions de trous noirs. Ces ondes sont porteuses d'informations précieuses sur les propriétés et le comportement des objets qui les ont émises.

D'un point de vue naïf, il semble absurde d'imaginer que l'*EHT* ou les détecteurs d'ondes gravitationnelles puissent révéler une quelconque entorse à la description des trous noirs par la relativité générale. On ne s'attend à voir des déviations à la théorie d'Einstein que dans des régions où la courbure de l'espace-temps est extrêmement forte, principalement à l'intérieur du trou noir. Or, au niveau de l'horizon d'un trou noir de plusieurs masses solaires, la courbure est assez faible. Pourtant, le paradoxe de l'information et les pistes de résolution avancées suggèrent que les changements aux lois de la physique ne se manifestent pas uniquement dans les profondeurs du trou noir, mais aussi à son horizon et en dehors. Dans le cas du trou noir de M87, la distance à laquelle nous nous attendons à trouver des déviations par rapport aux prédictions classiques est égale à plusieurs fois la taille du Système solaire.

Déjà, *Ligo-Virgo* et le réseau *EHT* ont exclu certaines pistes. Spécifiquement, si les trous noirs étaient remplacés par des vestiges massifs de plus de deux fois le diamètre du supposé trou noir, nous en aurions vu des signes dans les données observationnelles. Dans le cas de l'*EHT*, une bonne partie du rayonnement qui a produit les images désormais célèbres provient d'une région dont la taille fait environ 1,5 fois le diamètre de l'horizon. Et pour *Ligo-Virgo*, une partie du signal que nous détectons est émise quand les deux objets sur le point d'entrer en collision se retrouvent à une distance

À lire

THEMA
Les trous noirs

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

En vente sur notre site uniquement :
boutique.pourlascience.fr

comparable. Bien que l'étude de ces signaux n'en soit qu'à ses débuts, l'*EHT* et *Ligo-Virgo* ont révélé des objets très sombres et très compacts qui produisent des signaux en très bon accord avec ceux prédits pour les trous noirs de la relativité générale.

Cependant, il est important d'étudier ces signaux plus en détail. Une analyse minutieuse mettra peut-être au jour des indices supplémentaires sur la nature quantique des trous noirs. Et même si aucun nouvel effet n'est observé, nous aurons alors des informations qui contraignent les descriptions possibles de leur comportement quantique.

Des vestiges de grand diamètre sont maintenant exclus, mais qu'en est-il des scénarios de vestiges qui ne modifient la description du trou noir que tout près de l'horizon ? Bien qu'une discussion complète nécessite une théorie plus développée de ces vestiges (tels que les pelotes duveteuses ou les murs de feu), nous pourrons peut-être observer bientôt de premiers indices. Si ces objets avaient des rayons à peine plus grands que le rayon de l'horizon du trou noir correspondant, il est probable que ni l'*EHT* ni *Ligo-Virgo* ne seront assez sensibles pour révéler une telle structure, parce que très peu de lumière ou de >

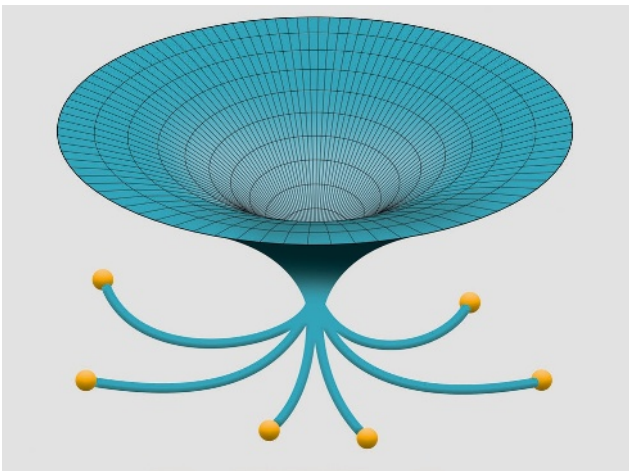
ER = EPR, LA PISTE INTRIQUÉE

Dans son article, Steven Giddings insiste sur un point crucial : les solutions au paradoxe de l'information ne doivent pas violer le principe de localité. Ce dernier implique qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière, en accord avec la relativité restreinte d'Einstein. Cependant, une autre façon de définir la localité est de dire que deux objets distants ne peuvent avoir d'influence directe l'un sur l'autre. Avec cette définition, on constate que la mécanique quantique est non locale à cause du phénomène d'intrication. Deux particules intriquées voient leurs propriétés corrélées de telle sorte qu'une mesure sur une particule influe instantanément sur l'autre, même si elles sont très éloignées l'une de l'autre. Ce phénomène ne viole pas la relativité restreinte, car il n'est pas possible de l'utiliser pour transmettre de l'information.

Des physiciens se sont demandé s'il n'était pas possible de sauver l'information du trou noir grâce à des processus impliquant l'intrication, où le contenu du trou noir serait intriqué avec le rayonnement de Hawking. En 2012, Joseph Polchinski, de l'université de Californie à Santa Barbara, et ses collègues ont montré que l'information pouvait être sauvée au prix de la formation d'un « mur de feu » au niveau de l'horizon des événements. Cette conclusion semblait solide et inéluctable. Mais elle était dérangeante, car, en relativité générale, un astronaute qui franchit l'horizon d'un grand trou noir ne sentirait rien, alors qu'avec le mur de feu il serait aussitôt désintégré et converti en énergie pure !

En 2013, Juan Maldacena, de l'Institut des études avancées de Princeton, et Leonard Susskind, de l'université Stanford, ont proposé une piste pour contourner l'émergence du mur de feu. Ils ont conjecturé une relation forte entre l'intrication quantique et une solution des équations de la relativité générale : les trous de ver. Ces objets permettent de relier deux régions de l'Univers par une sorte de raccourci dans l'espace-temps. Les trous de ver particuliers considérés par les deux physiciens sont dits « non traversables », car, même s'ils relient des endroits distants, ils ne permettent pas le transfert d'information, un peu comme le lien créé entre particules par le phénomène d'intrication quantique. La relation proposée est nommée « conjecture ER = EPR » pour, d'un côté, le pont Einstein-Rosen (un trou de ver de la relativité générale) et, de l'autre, le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen, qui a historiquement mis en évidence les propriétés de l'intrication quantique.

Juan Maldacena et Leonard Susskind se sont intéressés à un modèle idéalisé et peu réaliste : un trou noir éternel (c'est-à-dire qu'il n'est pas né de l'effondrement d'une étoile). Mathématiquement, cet objet peut être interprété comme deux trous noirs dans deux univers différents et partageant le même intérieur. Par conséquent, ils sont quantiquement intriqués. Cette intrication se concrétiserait géométriquement par un trou de ver qui relie les deux trous noirs. En analysant les conséquences de leur conjecture, les deux physiciens ont suggéré que l'intérieur d'un trou noir éternel était connecté au rayonnement de Hawking par des trous de ver. Cette forme d'intrication permet de contourner le problème du mur de feu. Mais cette astuce fonctionne-t-elle aussi avec un trou noir non éternel (pour lequel cet étonnant second univers n'existe pas) ?



Un trou noir déforme l'espace-temps et l'information ne peut *a priori* pas s'en échapper. Une solution possible à ce problème est que le rayonnement de Hawking *(en jaune)* serait relié par des trous de ver à l'intérieur du trou noir.

En 2019, le groupe d'Ahmed Almheiri, de l'Institut des études avancées de Princeton, puis Geoffrey Penington, de l'université Stanford, ont ainsi étudié des trous noirs non éternels. Ce dernier physicien a considéré le cas d'un trou noir dans une géométrie particulière, dite « anti-de Sitter » (notée AdS et qui ne correspond pas à notre monde), qui lui a permis d'utiliser des outils mathématiques très puissants (la dualité AdS/CFT notamment). Il a alors démontré qu'il était possible de récupérer dans le rayonnement de Hawking l'information tombée dans le trou noir. Cette avancée permettra peut-être de trouver une solution plus générale (application à notre Univers) du paradoxe de l'information dans un trou noir.

SEAN BAILLY
Pour la Science

© Pour la Science, d'après New Scientist

Le détecteur *Virgo*, près de Pise, collabore avec les interféromètres *Ligo*, aux États-Unis. Ils traquent des ondes gravitationnelles émises par la coalescence de trous noirs ou d'étoiles à neutrons.

Ligo et Virgo pourraient détecter des échos gravitationnels

> rayonnement gravitationnel émane de cette région proche de l'horizon.

Une exception possible est celle des « échos » gravitationnels. En 2016, Vitor Cardoso, de l'université de Lisbonne, et ses collègues ont suggéré que si deux vestiges se combinent pour former un vestige final qui, pendant un temps très court, vibre avant de se stabiliser, les ondes gravitationnelles émises lors de cette phase de transition peuvent se réfléchir sur la surface du vestige, et cette réverbération (les échos) serait observable comme un motif qui se répète de façon atténuée dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles. En octobre 2020, la collaboration *Ligo-Virgo* a publié un catalogue enrichi de 39 détections de fusions d'une paire de trous noirs ou d'étoiles à neutrons. Son analyse ne met en évidence aucun écho, ce qui contraint d'autant les scénarios de vestiges.

La plupart de ces scénarios à vestige modifiant la nature de l'horizon seront donc difficiles à écarter sur la base des seules observations. Et, comme nous l'avons mentionné, d'un point de vue théorique, il reste difficile de comprendre pourquoi ces objets restent stables et ne s'effondrent pas à leur tour pour former des trous noirs. Ce problème est général à tous les scénarios de vestiges massifs, mais il devient encore plus aigu dans la situation d'une collision de deux de ces objets.

Les perspectives sont meilleures pour tester certains des scénarios où de nouvelles interactions apportent des modifications subtiles de la géométrie de l'espace-temps, mais s'étendent très au-delà de l'horizon. Par exemple, dans le scénario « non violent fort », la vibration du halo quantique du trou noir peut dévier la lumière passant à proximité du trou noir. Si ce scénario est correct, le scintillement entraînerait des distorsions des images de l'*EHT* qui changeraient au cours du temps.

Avec Dimitrios Psaltis, de l'université de l'Arizona, nous avons calculé que ces changements se produiraient sur une durée d'environ une heure pour le trou noir supermassif situé au centre de la Voie lactée. Parce que l'*EHT* combine des observations sur plusieurs heures et en fait une moyenne, de tels effets seraient sans doute difficiles à voir. Mais les temps caractéristiques des fluctuations pour le trou noir supermassif de M87, qui est mille fois plus gros, seraient plutôt de l'ordre de quelques dizaines de jours. En prolongeant les durées de prises de données de l'*EHT* (de sept jours dans le projet initial), nous pourrions déceler ces distorsions.

© Collaboration Virgo

Cette découverte constituerait un indice fantastique pour accéder à la physique quantique des trous noirs. Si, au contraire, ces fluctuations ne sont pas présentes, nous serons aiguillés vers le scénario quantique faible, plus subtil, ou vers quelque chose d'encore plus exotique.

Le scénario «non violent faible» est plus difficile à tester en raison de la petitesse des changements géométriques attendus. Mais des études préliminaires montrent que ce scénario modifierait la façon dont les ondes gravitationnelles sont absorbées ou réfléchies, ce qui produirait peut-être une modification observable des signaux d'ondes gravitationnelles.

Si l'un de ces scénarios est correct, nous en apprendrons davantage non seulement sur ce que sont les trous noirs, mais également sur la nature profonde du monde. Pour l'instant, nous ne savons pas clairement comment caractériser la localisation de l'information en présence de champs gravitationnels. Les avancées récentes en physique quantique suggèrent que l'espace-temps lui-même n'est peut-être pas une composante fondamentale du monde, mais émergerait d'une structure mathématique plus profonde. Des signes de trous noirs quantiques pourraient nous aider à concrétiser cette idée.

Pour en apprendre davantage, il est important d'améliorer à la fois les observations de l'*EHT* et les mesures d'ondes gravitationnelles. Pour l'*EHT*, il serait utile de réaliser des observations de durée nettement plus longues, ainsi que des images d'autres cibles, telles que le trou noir au centre de la Voie lactée, deux idées qui sont déjà au programme. Pour les ondes gravitationnelles, de nouveaux interféromètres, au Japon et en Inde, s'ajouteront aux installations existantes en Europe et aux États-Unis, dont on améliore constamment la sensibilité. Parallèlement, les théoriciens travaillent pour affiner leurs modèles, étayer leurs explications et évaluer comment ces scénarios affectent les signaux de l'*EHT* et des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

Quelle que soit la solution du paradoxe de l'information, les trous noirs renferment des indices cruciaux pour tendre vers une théorie quantique de la gravitation et déterminer la nature même de l'espace et du temps. Comme avec les atomes et la mécanique quantique au début du XX[e] siècle, une meilleure compréhension des trous noirs a toutes les chances de montrer la voie de la prochaine révolution conceptuelle de la physique. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. B. Giddings, **Black holes in the quantum Universe**, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 377, 20190029, 2019.

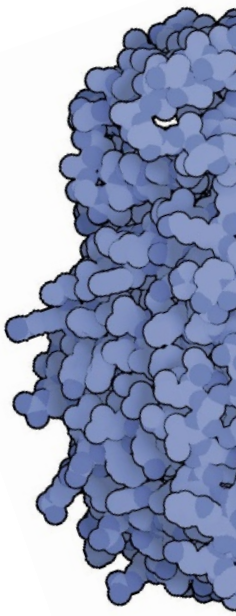
D. Harlow, **Jerusalem lectures on black holes and quantum information**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 88, 015002, 2016.

J. Polchinski, **L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?**, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

S. W. Hawking, **Particle creation by black holes**, *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43(3), pp. 199-220, 1975.

Les molécules du toucher se dévoilent

Comment les cellules détectent-elles le contact et la pression mécanique pour ensuite transmettre la perception tactile vers le cerveau ? Après des décennies d'interrogations, les chercheurs ont découvert quelques-unes des protéines à la clé de ce processus.



La jeune fille s'efforçait de garder bras et mains immobiles, mais ses doigts se tortillaient en tous sens. Si elle fermait les yeux, c'était encore pire. Ce n'est pas qu'elle manquait de force pour les maîtriser, non : elle n'avait pas vraiment de contrôle fin sur ses membres.

Carsten Bönnemann se souvient d'avoir examiné cette adolescente dans un hôpital de Calgary, au Canada, en 2013. En tant que pédiatre neurologue à l'Institut national américain des troubles neurologiques et des accidents vasculaires cérébraux, à Bethesda, dans le Maryland, il voyageait souvent pour s'occuper de cas déroutants. Mais cette fois, il dut reconnaître qu'il n'avait jamais rien vu de tel.

Si la jeune fille ne regardait pas ses membres, elle semblait dépourvue de toute indication sur leur position. Il lui manquait le sens de la disposition de son corps dans l'espace, une aptitude cruciale nommée « proprioception ». « C'est quelque chose qui lui est totalement étranger », précise Carsten Bönnemann.

En 2016, son équipe a séquencé le génome de l'adolescente et celui d'une autre jeune fille présentant des symptômes similaires, et a identifié des mutations dans un gène noté *Piezo2*. Par une heureuse coïncidence, quelques années plus tôt, en 2010, l'équipe d'Ardem Patapoutian, de l'institut de recherche Scripps, à La Jolla, avait identifié la fonction de ce gène. Alors qu'ils cherchaient à déterminer par quels mécanismes les cellules sentent le toucher, ces chercheurs avaient démontré que le gène en question codait une protéine sensible à la pression physique.

LES PROTÉINES PIEZO, DES CANAUX IONIQUES MÉCANOSENSIBLES

La découverte de cette protéine, Piezo2, et d'une autre apparentée, Piezo1, a été l'apogée de plusieurs décennies de recherche sur les mécanismes qui contrôlent le sens du toucher. Les Piezo sont des canaux ioniques – c'est-à-dire des pores dans la membrane cellulaire qui permettent le passage des ions – sensibles à une tension mécanique. « Nous avons beaucoup appris sur la façon dont les cellules communiquent, et c'est presque toujours par signalisation chimique, explique Ardem Patapoutian. Ce dont on est en train de s'apercevoir aujourd'hui, c'est que la sensation mécanique d'une force physique est aussi un mécanisme de signalisation. Et pour l'heure, on en sait très peu à ce sujet. »

L'ESSENTIEL

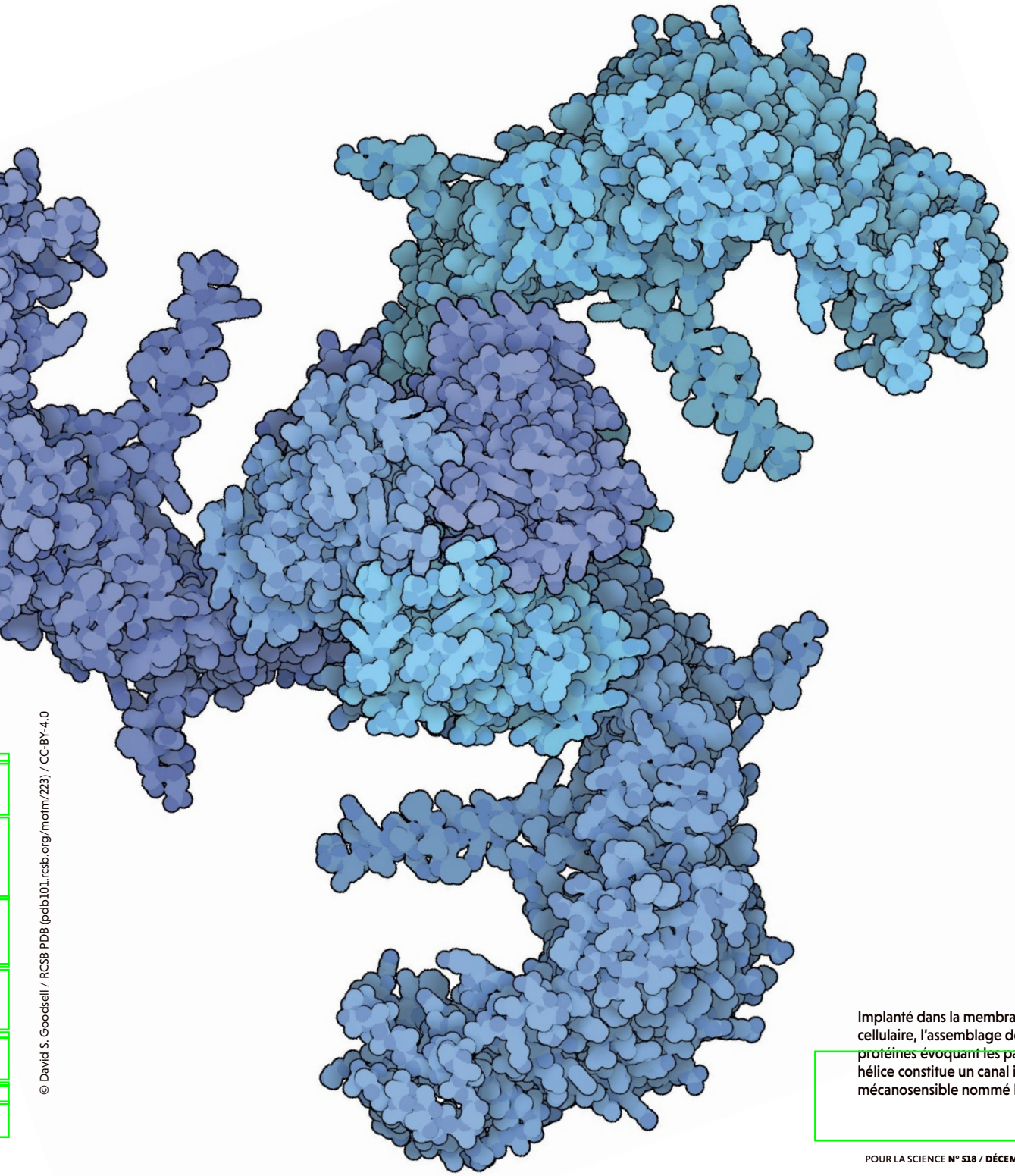
> Le sens du toucher repose sur des canaux ioniques sensibles aux forces mécaniques et présents dans la membrane des cellules, que l'on commence tout juste à identifier.

> Ces molécules sont impliquées dans les sens du toucher, de l'équilibre, de l'ouïe… Elles jouent aussi un rôle dans la formation des os ou la perception de la circulation sanguine par les cellules.

> Des anomalies de ces mécanorécepteurs sont à l'origine de diverses maladies, telles que certaines douleurs chroniques.

L'AUTRICE

AMBER DANCE
journaliste scientifique indépendante basée à Los Angeles, en Californie



© David S. Goodsell / RCSB PDB (pdb101.rcsb.org/motm/223) / CC-BY-4.0

Implanté dans la membrane cellulaire, l'assemblage de trois protéines évoquant les pales d'une hélice constitue un canal ionique mécanosensible nommé Piezo1.

> Le toucher contribue au fonctionnement de presque tous les types de tissus et de cellules, précise Ardem Patapoutian. Les organismes interprètent les forces pour comprendre leur monde, que ce soit pour apprécier une caresse ou éviter un stimulus douloureux. Dans le corps, les cellules perçoivent le sang circuler, l'air gonfler les poumons, l'estomac ou la vessie se remplir. De même, l'audition fait intervenir des cellules de l'oreille interne qui détectent la pression des ondes sonores.

DES STRUCTURES ÉTUDIÉES PAR CRYOMICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE

Au cours de la dernière décennie, les études sur les canaux Piezo et d'autres canaux ioniques mécanosensibles se sont multipliées. Plus de 300 articles scientifiques ont été publiés sur les seuls Piezo depuis trois ans. L'une des questions soulevées est de savoir comment ces protéines, situées dans la membrane cellulaire, détectent les forces et y réagissent. Grâce à la cryomicroscopie électronique [qui consiste à congeler à très basse température des tissus biologiques pour pouvoir les observer avec un microscope électronique de fort grossissement, ndlr], les scientifiques ont progressé dans l'élucidation de la structure – quelque peu intrigante – de ces canaux Piezo, qui apparaissent ainsi formés de trois pales, comme une hélice; mais à ce jour, on ignore encore le mécanisme d'action précis de ces pores.

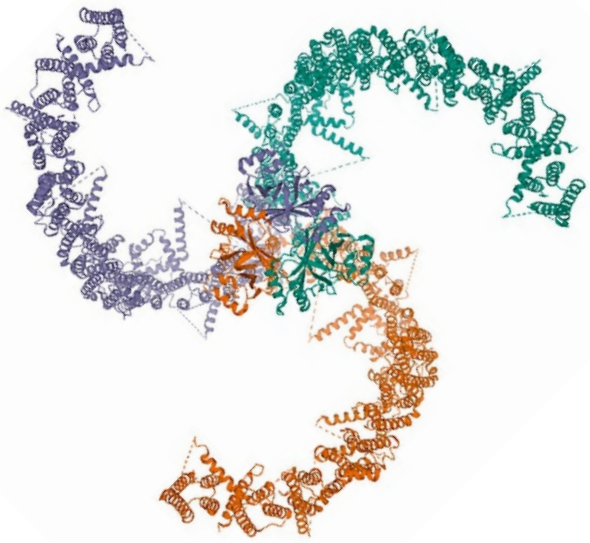
Les chercheurs découvrent également que les Piezo participent à d'autres fonctions que le toucher et la proprioception. Par exemple, ils aideraient à expliquer pourquoi certaines personnes sont résistantes au paludisme, et peut-être même pourquoi les cosmonautes perdent de la densité osseuse en orbite. Et, déjà, les scientifiques cherchent à cibler ces protéines sensibles aux forces avec des médicaments, pour traiter, par exemple, la douleur chronique. «On savait depuis longtemps que les cellules faisaient cela [à savoir détecter les forces et les pressions, ndlr], mais nous n'avions aucune idée de la façon dont elles s'y prenaient», précise Miriam Goodman, physiologiste sensorielle à l'université Stanford, en Californie. «Les Piezo ont vraiment tout changé.»

Le toucher a longtemps été un sens complexe… D'autres aptitudes sensorielles, comme la vue et le goût, sont beaucoup mieux comprises, explique Ardem Patapoutian : les photons qui atteignent l'œil ou les molécules qui s'infiltrent dans le nez et sur la langue activent tous des récepteurs de la même famille. Ces derniers déclenchent alors l'ouverture de canaux ioniques dans les membranes cellulaires et permettent ainsi à des ions positifs d'entrer dans les cellules. Ce qui les dépolarise, et le stimulus est ainsi converti en un signal électrique que le cerveau décode et interprète.

Les scientifiques soupçonnaient que pour le toucher, la proprioception et l'audition, il devait exister une protéine agissant à la fois comme capteur de force et comme canal ionique, car pour l'ouïe par exemple la signalisation [la conversion du stimulus en signal électrique, ndlr] se fait rapidement, en quelques microsecondes. Mais l'identité de ces protéines à la fois canaux et capteurs est longtemps restée mystérieuse, du moins chez les mammifères. En effet, les chercheurs avaient seulement trouvé quelques canaux mécanosensibles chez les bactéries, les drosophiles (ou mouches à vinaigre) et les vers nématodes.

> **On cherche déjà à cibler ces protéines pour traiter la douleur chronique**

Ardem Patapoutian et son collègue Bertrand Coste ont alors élaboré un plan. Ils allaient mener leur recherche sur un type de cellules de souris dont ils savaient qu'elles étaient capables de transformer un très léger contact de la pointe d'une pipette en un courant électrique détectable. Bertrand Coste allait inactiver les uns après les autres les gènes dont il suspectait qu'ils pouvaient coder des canaux ioniques, un à un dans chaque lot de cellules, afin de rechercher le lot qui aurait soudainement perdu sa sensibilité au toucher. Confiant, il commença ainsi ses expériences,



pensant qu'il lui faudrait quelques mois, au mieux des semaines, pour obtenir un résultat.

En réalité, cela lui a pris une bonne partie de l'année. Peu avant la fin de 2009, il observa quelque chose – ou plutôt, il ne vit plus rien: alors qu'il piquait un lot de cellules avec sa pipette, elles ne réagirent pas. Le chercheur pensa qu'il avait dû éliminer un canal sensible aux forces. «C'était une très belle journée», se souvient Bertrand Coste, aujourd'hui chercheur du CNRS à Marseille. Avec Ardem Patapoutian, il nomma alors le gène de souris correspondant *Piezo1*, du mot grec signifiant «pression», et a rapidement identifié le *Piezo2*. Plus tard, en 2014, l'équipe a ensuite directement relié le *Piezo2* à la sensation de toucher dans les neurones sensoriels et les cellules de peau des souris.

Les chercheurs étaient alors très enthousiastes, se souvient Miriam Goodman, notamment parce que les protéines Piezo codées par ces gènes étaient très grosses et très complexes. Composée de plus de 2500 acides aminés et pesant 300 kilodaltons, la structure de Piezo1 traverse la membrane cellulaire 38 fois: un record! En comparaison, les protéines des mammifères contiennent en général jusqu'à 500 acides aminés.

DE TRÈS GROSSES PROTÉINES

Malheureusement, cette taille gigantesque a empêché les chercheurs de répondre à des questions essentielles: comment ces canaux ioniques perçoivent-ils les forces et pressions? Comment s'ouvrent-ils et se ferment-ils? La structure d'une protéine aide beaucoup à répondre à ce genre de questions, explique le biophysicien Roderick MacKinnon, de l'université Rockefeller, à New York. «Nous ne savons rien tant que nous ne l'avons pas vraiment visualisée.»

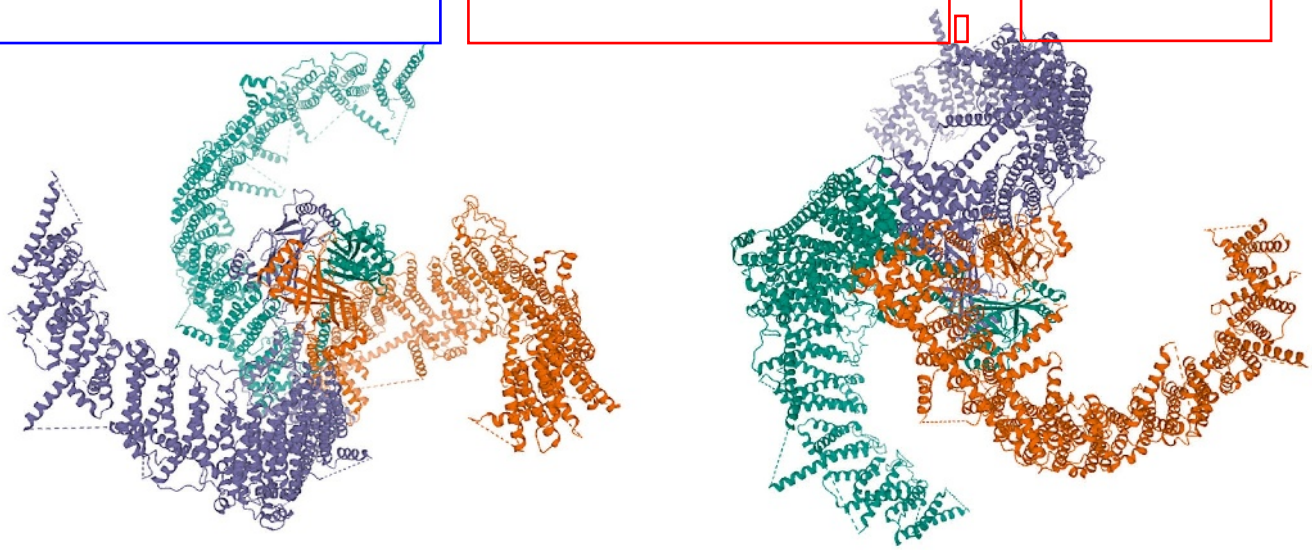
En effet, les techniques d'analyse de la structure des molécules, telles que la cristallographie aux rayons X et la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire, ne sont pas bien adaptées aux protéines complexes et de grande taille, explique le neuroscientifique Bailong Xiao, de l'université Tsinghua, à Pékin, ancien postdoctorant au laboratoire d'Ardem Patapoutian. Heureusement, à ce moment-là, quand Bailong Xiao installait son laboratoire en 2013, une autre méthode permettant d'obtenir des structures en haute résolution se développait: la cryomicroscopie électronique.

Son équipe a donc utilisé cette technique pour proposer, en 2015, les premières images de la structure tridimensionnelle de Piezo1. Depuis, les groupes de Bailong Xiao, Roderick MacKinnon et Ardem Patapoutian ont présenté d'autres versions en plus haute résolution de la protéine.

COMME LES TROIS PALES D'UNE HÉLICE

En septembre 2019, Bailong Xiao a poursuivi ses analyses avec une image de Piezo2, similaire à celle de Piezo1 par sa taille et par sa forme. À ce jour, cette image donne la vue la plus nette des extrémités des trois pales du complexe protéique, qui bougent et sont donc difficiles à visualiser. Les images sont saisissantes. Trois protéines Piezo s'associent en un complexe trimère qui traverse la membrane plasmique de la cellule (*voir l'encadré page 38*). À partir du pore central, trois bras s'échappent ainsi en spirale, comme les pales d'une hélice. Ils s'incurvent vers le haut et l'extérieur, créant un profond sillon à la surface de la cellule.

Ardem Patapoutian et Bailong Xiao pensent que lorsqu'une force s'exerce sur la membrane, les pales déplacent des poutrelles protéiques à l'intérieur du canal, ce qui, d'une certaine façon, ouvre le pore. Pour Roderick MacKinnon, la façon inhabituelle dont les pales des Piezo plissent la membrane suggère un mécanisme distinct: si une poussée ou une traction augmente la tension de la membrane, le canal incurvé s'aplatirait, ce qui ouvrirait le pore. >



Trois vues, sous des angles différents, de la structure tridimensionnelle du canal ionique Piezo2, un autre canal ionique mécanosensible.

© L. Wang et al./RCSB PDB (doi: 10.2210/pdb6kg7/pdb)

> Ces hypothèses ne peuvent pas encore être vérifiées, car les chercheurs n'ont pour l'instant pu étudier que des protéines Piezo isolées, extraites de leur membrane et ayant donc une conformation fermée. Enregistrer une image d'un Piezo intégré à une membrane cellulaire et en conformation ouverte devrait aider les scientifiques à en comprendre ses secrets. « Nous voulons le voir dans son environnement naturel », explique Ardem Patapoutian.

Plusieurs équipes essaient donc d'obtenir l'image d'un Piezo ouvert. Le groupe d'Ardem Patapoutian utilise un composé qui active le Piezo1 et qu'il a nommé Yoda1, d'après le surnom du maître Jedi dans la saga *Star Wars*. Patapoutian espère qu'avec la présence de Yoda1, Piezo1 pourrait s'ouvrir le temps d'une

CAPTEURS CELLULAIRES DE FORCES MÉCANIQUES

Les cellules présentent dans leur membrane des protéines spécialisées qui leur permettent de détecter les forces et les pressions. Les protéines Piezo sont parmi les mieux caractérisées chez les mammifères : elles forment des canaux qui transportent les ions de part et d'autre de la membrane cellulaire. Les chercheurs tentent de déterminer comment ces canaux s'ouvrent et se ferment.

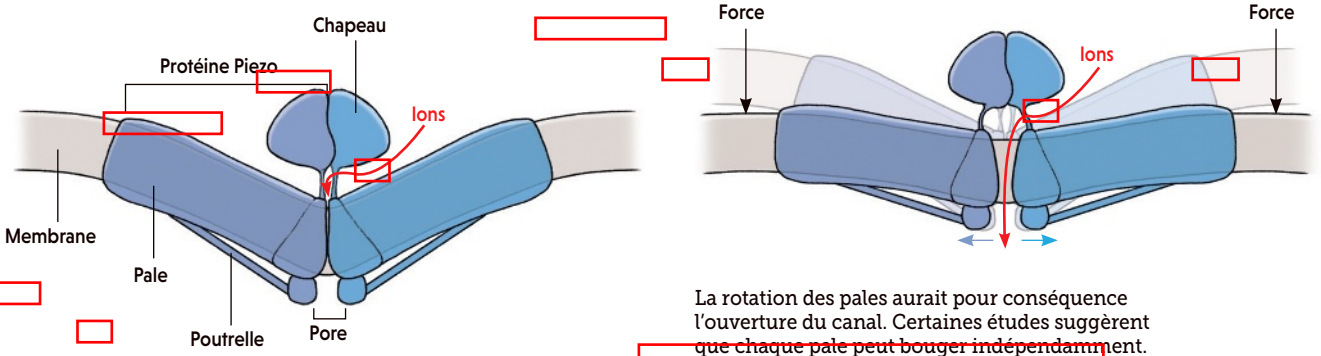
CANAL IONIQUE FERMÉ

Les images de canaux fermés révèlent qu'ils sont construits à partir de trois protéines Piezo, chacune apportant une pale et une poutrelle disposées autour d'un pore central. Le canal plisse la membrane dans laquelle il se trouve, formant ainsi une petite butte.

CANAL IONIQUE OUVERT

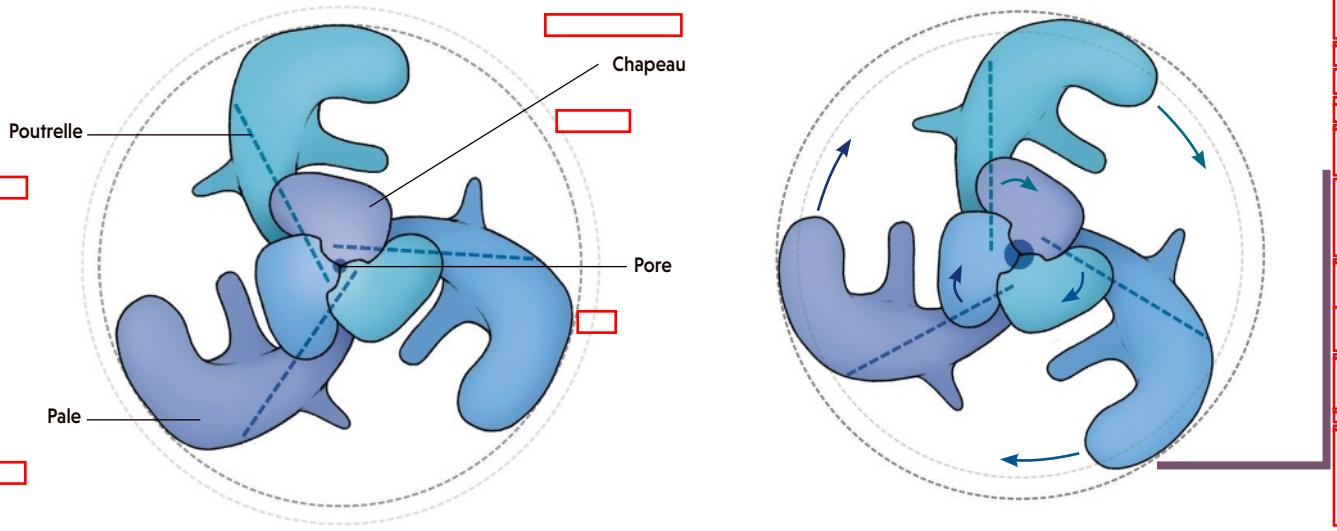
Il n'existe pas d'images de canaux Piezo ouverts, mais les chercheurs ont quelques hypothèses sur la façon dont ils pourraient s'ouvrir. Les pales incurvées s'aplatiraient pour ouvrir le pore, ou une force déplacerait les pales, agissant d'une manière ou d'une autre sur les poutrelles pour ouvrir le canal.

VUE DE PROFIL



La rotation des pales aurait pour conséquence l'ouverture du canal. Certaines études suggèrent que chaque pale peut bouger indépendamment.

VUE DU DESSUS



© Yousun Koh, d'après A. Dance, « Feel the force », Nature, vol. 577, pp. 158-160, 2020

«photographie». Il s'intéresse également à l'insertion des protéines Piezo dans des membranes artificielles appelées «nanodisques», ce qui permettrait de stabiliser la conformation ouverte. Bailong Xiao, lui, utilise toujours la cryomicroscopie électronique pour visualiser l'échantillon sous différents angles d'inclinaison, ce qui permettrait de clarifier la structure des Piezo, que ce soit dans des membranes naturelles ou artificielles.

DES FONCTIONS DIVERSES DANS L'ORGANISME

Parallèlement à ces études structurales, les scientifiques découvrent que les protéines Piezo jouent des rôles variés dans l'organisme. En 2014, le neuroscientifique Alex Chesler a rejoint le Centre américain pour la santé intégrative et complémentaire, à Bethesda. Inspiré par la découverte de Bertrand Coste, il créa alors des souris dépourvues de protéines Piezo2 pour étudier leur rôle dans le toucher. Puis, un jour, il reçut un courriel de Carsten Bönnemann, qui travaillait dans le même bâtiment que lui, à propos des jeunes filles qui ont perdu le sens de la proprioception.

Alex Chesler monta directement au bureau de Carsten Bönnemann. Haletant, il annonça: «Vous n'avez pas idée de ce que vous avez sous les yeux!» Alex Chesler ne pouvait évidemment pas demander à ses souris dépourvues de Piezo2 ce qu'elles ressentaient, ou plutôt ne ressentaient pas, mais il pouvait interroger les gens...

Carsten Bönnemann et lui invitèrent alors les jeunes filles à venir à Bethesda pour que leur état soit évalué plus en détail. Les deux adolescentes compensaient remarquablement bien leur handicap, en utilisant la vue pour réussir à marcher sur une ligne représentée au sol ou pour toucher une cible du doigt. Mais les yeux bandés, elles étaient complètement perdues. De même, elles sentaient les vibrations d'un diapason contre leur peau, car elles pouvaient l'entendre. Alors qu'en portant des casques antibruit, elles ne les remarquaient pas du tout.

COORDINATION DES MOUVEMENTS, DOULEURS CHRONIQUES...

Ardem Patapoutian a observé le même phénomène chez des souris: sans protéine Piezo2 dans les nerfs qui innervent les muscles et les tendons, les rongeurs souffrent d'un trouble de la proprioception et n'arrivent pas à coordonner leurs mouvements. Son équipe a également montré que les Piezo2 interviennent dans les neurones sensibles à la douleur, notamment dans les cas d'allodynie, un type de sensations douloureuses dans lesquelles même une légère caresse donne l'impression que l'on est piqué par des aiguilles. Certaines personnes atteintes de douleurs neuropathiques souffrent d'une telle hypersensibilité en permanence.

En revenant d'une mission sur la *Station spatiale internationale*, le cosmonaute russe Sergey Ryazanskiy a des difficultés à se tenir debout après son séjour en apesanteur. Il a probablement perdu de la densité osseuse en raison d'une sous-stimulation des canaux Piezo.

© Nasa/Bill Ingalls

Les souris aussi présentent une forme d'allodynie lorsqu'on leur injecte de la capsaïcine, la molécule des piments forts, ou après une lésion nerveuse... sauf s'il leur manque le gène *Piezo2*! D'ailleurs, en 2018, Alex Chesler et Carsten Bönnemann ont également constaté des changements similaires dans la perception de la douleur chez les personnes présentant des mutations de *Piezo2*.

«La douleur chronique a un effet très néfaste et insupportable», explique Swetha Murthy, qui a dirigé l'une des études sur l'allodynie quand elle était postdoctorante dans l'équipe d'Ardem Patapoutian. «Je pense que nous pouvons commencer à identifier des cibles médicamenteuses pour le Piezo2 dans ces cas de neuropathies.» Ainsi, Ardem Patapoutian et Alex Chesler sont tous deux à la recherche de molécules qui bloqueraient l'activité des Piezo2 au niveau d'un site douloureux, sans interférer avec les autres rôles des protéines dans l'organisme. «Il existe un énorme potentiel pour la découverte de médicaments qui cibleraient les canaux Piezo», déclare Bailong Xiao.

DES AFRICAINS RÉSISTANTS AU PALUDISME

Il n'y a pas que les neurones qui ont besoin de ressentir le toucher et la pression; presque toutes les cellules sont soumises à des forces. Prenez les globules rouges (ou hématies) par exemple, qui se déforment pour se déplacer dans de minuscules capillaires sanguins. Les mutations provoquant une hyperactivation de Piezo1 engendrent un «ratatinage» de ces cellules sanguines, ce qui est à l'origine d'une anémie chez les personnes atteintes d'une maladie rare appelée «stomatocytose héréditaire avec hématies déshydratées» (DHS). >

Article initialement publié sous le titre « Feel the force » dans la revue *Nature* (vol. 577, pp. 158-160, 9 janvier 2020), https ://www.nature.com/articles/d41586-019-03955-w

© Nature Publishing Group

> Ces cellules sanguines «ratatinées» rappellent à Ardem Patapoutian celles que l'on retrouve dans la drépanocytose. En effet, la mutation du gène de la drépanocytose a persisté chez de nombreuses personnes d'origine africaine, car elle protège contre le paludisme. Dès lors, le chercheur se demande si des mutations de *Piezo1* feraient de même… Si tel est le cas, le taux de ces mutations devrait être relativement élevé chez les individus d'origine africaine.

En 2018, des analyses de grandes bases de données ont validé cette hypothèse: en fait, un variant particulier de *Piezo1* existe chez un tiers des personnes ayant une ascendance africaine. Et en 2019, l'équipe d'Elizabeth Egan, de l'université Stanford, a confirmé que les individus portant cette mutation de *Piezo1* résistent mieux au paludisme.

DES OS SOLIDES

Selon l'équipe de Bailong Xiao, les protéines Piezo1 participent également à la formation et à l'entretien des os. Lorsque son équipe a «éteint» le gène *Piezo1* dans des ostéoblastes de souris – les cellules qui fabriquent les os –, les rongeurs ont grandi en étant plus petits et plus maigres que la normale. Les os longs supportant le poids de leur corps étaient plus légers, plus minces et plus fragiles que ceux des souris témoins.

De plus, en 2019, les chercheurs de l'équipe de Bailong Xiao ont montré que des rongeurs normaux partiellement suspendus en l'air, et qui n'ont donc pas à supporter leur poids en permanence, présentent des niveaux d'expression du gène *Piezo1* et des niveaux de masse osseuse plus faibles que les souris restées libres de leurs mouvements. Un phénomène qui ressemble beaucoup à ce qui arrive aux personnes atteintes d'ostéoporose, ou qui sont longtemps alitées, ainsi qu'aux cosmonautes à bord de la *Station spatiale internationale*, précise Bailong Xiao.

DES CANAUX MÉCANOSENSIBLES POUR ENTENDRE

«La découverte des canaux Piezo représente un énorme pas en avant, affirme Kate Poole, biologiste à l'université de Nouvelle-Galles du Sud à Sydney, en Australie, mais il est également clair que l'histoire ne se limite pas aux Piezo.» En fait, les scientifiques qui s'intéressent à l'audition recherchent le canal approprié depuis quatre décennies. «Il y a eu beaucoup de fausses pistes dans cette histoire», précise Jeffrey Holt, neuroscientifique à l'hôpital pour enfants de Boston, dans le Massachusetts. «Mais maintenant, nous pensons que nous avons une assez bonne idée de la situation.»

En effet, la protéine canal qui joue un rôle clé dans l'audition se nomme TMC1. En 2018, lorsque Jeffrey Holt et ses collègues ont modifié la séquence d'acides aminés qui composent cette protéine, ils ont aussi changé la capacité des cellules de l'oreille interne à traduire les signaux mécaniques [la pression des ondes sonores, ndlr] en signaux électriques. Et en 2019, une autre équipe a montré que la protéine TMC1 purifiée est capable de créer un canal ionique mécanosensible dans des bulles de membranes artificielles. Toutefois, la structure de TMC1 reste un mystère, car il est difficile de purifier la protéine en quantité suffisante pour obtenir de bonnes images en cryomicroscopie électronique.

On recherche d'autres familles de canaux mécanosensibles

Quant à l'équipe d'Ardem Patapoutian, elle est aujourd'hui à la recherche de nouvelles familles de canaux mécanosensibles. En 2018, Ardem Patapoutian, Swetha Murthy et le biologiste Andrew Ward, de l'institut de recherche Scripps, ont présenté ce qu'ils pensent être le plus grand groupe de canaux activés mécaniquement. Ils connaissaient déjà une famille de protéines qui permettent aux plantes de ressentir la pression osmotique: les protéines OSCA. Et ils pensaient qu'elles pourraient être sensibles à davantage de forces. Et en effet, dans des cellules rénales humaines, les OSCA ont aussi réagi à l'étirement des membranes cellulaires.

Les chercheurs savaient également, grâce à des études antérieures, que les protéines OSCA sont étroitement liées à une autre famille de protéines chez les mammifères, les TMEM63. Les canaux TMEM63 des souris, des humains et même des drosophiles ont aussi réagi à l'étirement dans les expériences de Swetha Murthy. Ainsi, les protéines OSCA et TMEM63 constituent une grande famille de canaux mécanosensibles, commune à de nombreuses espèces vivantes.

Les canaux découverts jusqu'à présent ne peuvent pas, à eux seuls, expliquer tous les cas de mécanosensibilité cellulaire, explique Swetha Murthy, aujourd'hui biophysicienne et neuroscientifique à l'université de santé et de sciences de Portland, dans l'Oregon. Il s'agit désormais de trouver d'autres mécanorécepteurs. Et ces derniers assurent probablement plus de fonctions que celles connues aujourd'hui, affirme Ardem Patapoutian: «Nous avons à peine effleuré la surface.» ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Wang *et al.*, **Structure and mechanogating of the mammalian tactile channel Piezo2**, *Nature*, vol. 573, pp. 225-229, 2019.

W. Sun *et al.*, **The mechanosensitive Piezo1 channel is required for bone formation**, *eLife*, vol. 8, e47454, 2019.

S. E Murthy *et al.*, **OSCA/TMEM63 are an evolutionarily conserved family of mechanically activated ion channels**, *eLife*, vol. 7, e41844, 2018.

A. T. Chesler *et al.*, **The role of Piezo2 in human mechanosensation**, *N. Engl. J. Med.*, vol. 375, pp. 1355-1364, 2016.

J. Ge *et al.*, **Architecture of the mammalian mechanosensitive Piezo1 channel**, *Nature*, vol. 527, pp. 64-69, 2015.

M. Szczot *et al.*, **Piezo2 mediates injury-induced tactile pain in mice and humans**, *Sci. Transl. Med.*, vol. 10(462), eaat 9892, 2018.

OFFRE NOËL

DURÉE LIBRE

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 cadeau : le livre *Pourquoi le Soleil brille de Roland Lehoucq* (3793106 9)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

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

PAG20NOE

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

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

+ UN CADEAU

DPV4E90K8

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — 6,50€ PAR MOIS
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

+ UN CADEAU

PPV6E50K15

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — 8,20€ PAR MOIS
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

+ UN CADEAU

IPV8E20K15

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

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

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Désignation du compte à débiter

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

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

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

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

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Pourquoi le Soleil brille* pour 16,00 €.

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

> Le *spolvero* est un procédé utilisé à la Renaissance italienne pour transférer, au moyen de poudre noire, un dessin préparatoire vers le support d'une peinture.

> L'utilisation du *spolvero* avait été mise en évidence sur certains tableaux de Léonard de Vinci, mais pas sur *La Joconde*.

> Grâce à de l'imagerie multispectrale et à LAM, une méthode d'analyse d'images développée par Pascal Cotte, trois zones de *La Joconde* ont révélé des traces de *spolvero*.

> La technique LAM se montre prometteuse pour l'analyse d'autres œuvres d'art ou documents.

LES AUTEURS

PASCAL COTTE
ingénieur et fondateur, en 1989, de la société Lumiere Technology, basée à Ponthierry

LIONEL SIMONOT
enseignant-chercheur à l'université de Poitiers, à l'institut P' du CNRS

La Joconde aussi a des points noirs

Des chercheurs ont mis en évidence, pour la première fois, l'utilisation du « spolvero », technique de transfert de dessin, sur le célèbre portrait de Mona Lisa peint par Léonard de Vinci.

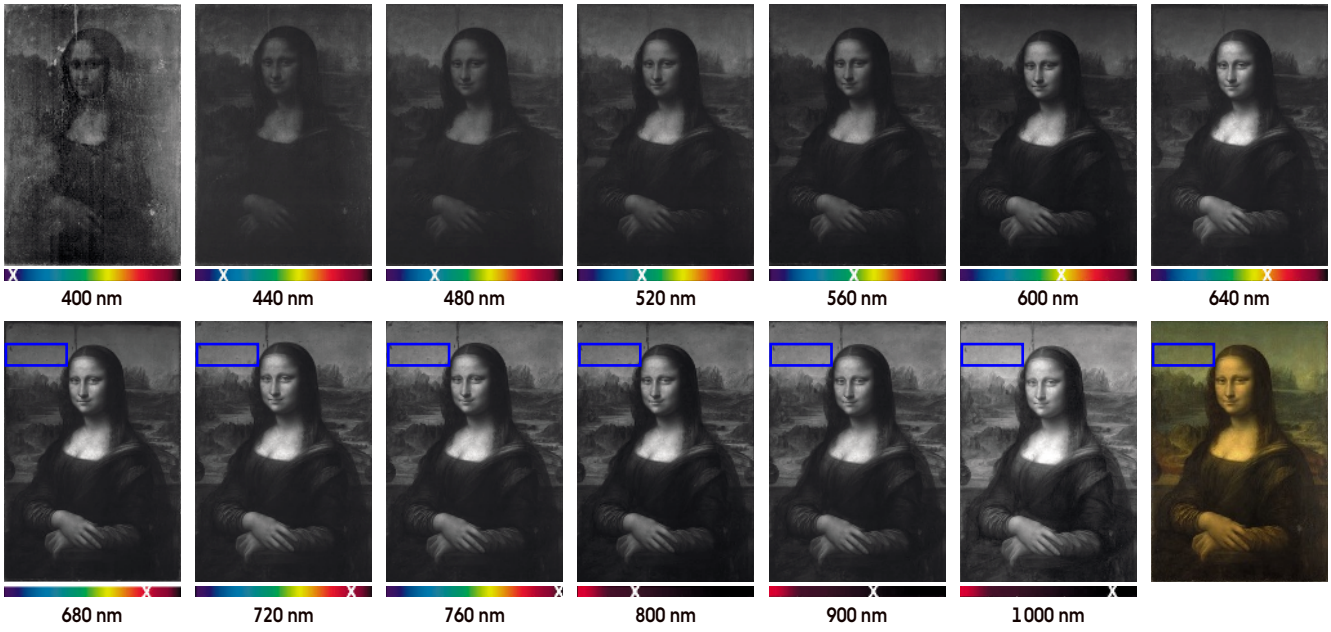
C'est peut-être la peinture la plus observée de l'art occidental. Des points noirs sur le front de *La Joconde* et à la jointure des mains n'avaient pourtant encore jamais été remarqués ni par les millions de visiteurs annuels du musée du Louvre, ni par les spécialistes de Léonard de Vinci, ni par aucun dispositif scientifique. À leur décharge, les points noirs de Mona Lisa ne sont pas visibles à l'œil nu. Ils ne se trouvent pas en surface, mais légèrement en profondeur de la couche picturale. Nous les avons découverts récemment à l'aide de méthodes d'imagerie et d'analyse d'images novatrices.

Ces points noirs témoignent de l'utilisation du *spolvero*, technique de transfert d'un dessin préparatoire vers l'œuvre picturale. Dans cette technique, le dessin est réalisé sur un « carton », feuille que l'on perce de petits trous suivant les contours du dessin, puis transféré sur un support en faisant passer à travers les trous du carton de la poudre (*polvere* en italien) de noir de charbon (*voir l'encadré page 46*).

Très utilisé à la Renaissance, le *spolvero* a été mis en évidence par réflectographie infrarouge (*voir plus loin*) depuis les années 1950 sur d'autres tableaux de Léonard de Vinci, tels la *Dame à l'hermine*, *La Belle Ferronnière* et le *Portrait de Ginevra de' Benci*. Dans le catalogue de l'exposition au Louvre sur Léonard de Vinci >

Malgré les millions de visiteurs du Louvre qui ont contemplé *La Joconde* et les nombreux spécialistes qui l'ont scrutée, ce tableau fait encore l'objet de découvertes.

© Shutterstock.com/Mitotico



Les treize images de *La Joconde* prises à des longueurs d'onde différentes, indiquées en nanomètres (dix dans le visible et trois dans l'infrarouge). La dernière image est une restitution en couleur. C'est l'analyse de ces images par la méthode LAM qui a mis en évidence les traces de *spolvero*.

> (octobre 2019-février 2020), une équipe du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) faisait la synthèse des dernières analyses scientifiques. Celles-ci n'avaient pu assurer l'existence d'un transfert pour *La Joconde*, mais les chercheurs affirmaient que « la pratique habituelle s'agissant des portraits le suggère fortement, au moins pour la tête ».

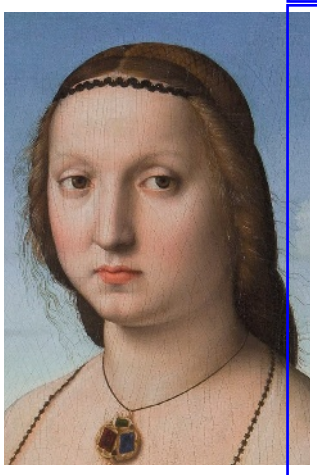
L'IMAGERIE INFRAROUGE NE SUFFIT PAS

Pourquoi n'avait-on pas détecté l'usage du *spolvero* sur *La Joconde* ? La réflectographie infrarouge est la technique la plus usuelle pour révéler des dessins sous-jacents. Elle consiste à éclairer la peinture avec de la lumière infrarouge, rayonnement invisible pour l'œil humain, et à prendre une photographie avec un capteur d'image sensible à ce rayonnement. La matière picturale est en effet en grande partie transparente aux infrarouges. Les dessins préparatoires apparaissent alors par contraste, le noir de charbon absorbant davantage les infrarouges que les autres matériaux utilisés. L'analyse de *La Joconde* par cette technique, publiée en 2006 dans le livre *Au cœur de La Joconde*, montrait une reprise par Léonard de Vinci dans la position des doigts de la main gauche. Mais pas de *spolvero*.

En 2004, à l'occasion d'une campagne de mesures scientifiques sur le tableau, l'un de nous, Pascal Cotte, a scanné *La Joconde* à l'aide d'une caméra multispectrale de sa conception, inspirée de systèmes d'imagerie pour la télédétection satellitaire. L'objectif était de mesurer précisément la couleur de chaque pixel dans la perspective de répéter l'opération plusieurs dizaines d'années plus tard et, ainsi, d'estimer les facteurs de vieillissement. Le procédé, à l'époque innovant pour l'analyse d'œuvres d'art, consiste à scanner le tableau *via* dix filtres optiques dans le visible et trois dans l'infrarouge (les caméras classiques, elles, ne sont sensibles qu'à trois canaux de couleur, les canaux rouge, vert et bleu).

Cette technique d'imagerie multispectrale est évidemment sans contact et les éclairements requis pour scanner le tableau sont choisis pour ne pas risquer d'endommager l'œuvre. Le procédé s'est depuis perfectionné avec une recherche de compromis entre résolution spectrale et spatiale. La caméra de Pascal Cotte ne fournit « que » 13 images (*voir la figure ci-dessus*), mais celles-ci présentent une haute résolution spatiale et une grande dynamique de mesure. Le résultat obtenu offre une signature spectrale pour chaque pixel, c'est-à-dire pour chaque point du tableau. Cela permet d'identifier certains pigments et de localiser leur utilisation sur le tableau, de proposer un allègement virtuel et réaliste du vernis vieilli, ou encore, grâce aux canaux dans l'infrarouge, de confirmer les observations réalisées en réflectographie infrarouge. Mais en 2004, même en augmentant au maximum le contraste des images, il n'y avait toujours pas de trace de *spolvero*.

Pascal Cotte passera alors plus d'une dizaine d'années à étudier dans les moindres détails ses images de Mona Lisa. Au cours de cette période, il eut l'idée de développer une méthode de



Dans le *Portrait de Maddalena Doni* par Raphaël *(ici un détail)*, le voile sur le front présente une broderie. Le *spolvero* révélé sur *La Joconde* pourrait être le dessin d'une telle broderie, abandonné ensuite par Léonard de Vinci.

En haut : © Pascal Cotte ; en bas : © Wikimedia Commons

traitement d'images multispectrales appelée LAM (pour *Layer amplification method*, «méthode d'amplification de couche»).

TRAITEMENT D'IMAGES MULTISPECTRALES

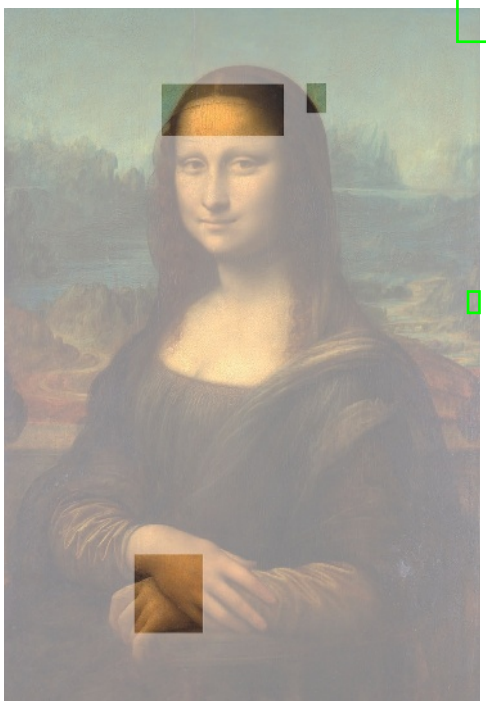
Le principe consiste à appliquer pixel par pixel des opérations mathématiques, telles que des différences pondérées d'intensité, sur des images de deux ou trois canaux spectraux différents. Le choix des longueurs d'onde et des opérations implique de nombreuses combinaisons et est difficile à automatiser. En effet, les choix optimaux dépendent des couches de peinture recouvrant le dessin et peuvent différer beaucoup d'une zone à l'autre. La détection des informations (traits de dessins, reprises de l'artiste, coups de pinceau, *spolvero*, restaurations, etc.) se fait d'abord en visualisant un jeu d'images LAM d'une même zone puis, si un signal intéressant est détecté, en ajustant les paramètres des opérations pour un réglage plus fin.

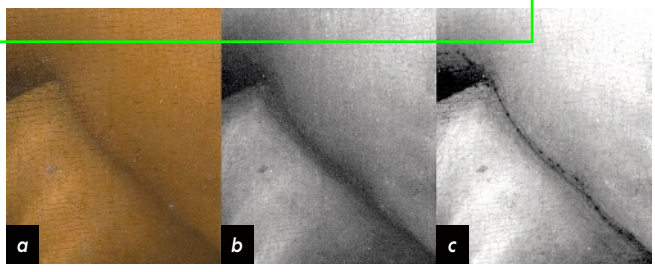
Toute la surface de *La Joconde* a ainsi été étudiée systématiquement par petites zones. Et vers 2015, trois d'entre elles se sont révélées d'un grand intérêt (*voir la figure ci-dessous*) : la jointure des mains de Mona Lisa, son front et une petite région au-dessus de la tête.

À la jointure des mains, le *spolvero* a été mis en évidence en utilisant uniquement des canaux dans le visible, à 480 et 720 nanomètres de longueur d'onde. Les images montrent que la peinture finale a repris le dessin préparatoire des points de *spolvero*.

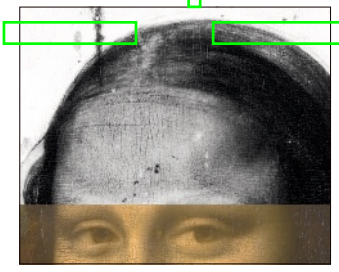
Sur le front, les points de *spolvero* sont reliés, mais ils ne correspondent pas à la démarcation du front et du voile de Mona >

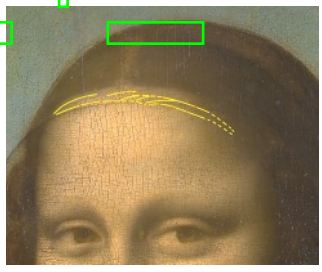
La méthode d'analyse LAM implique des choix difficiles à automatiser

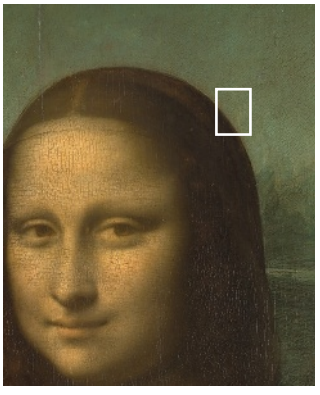




Vue en couleurs | Image infrarouge | Image LAM



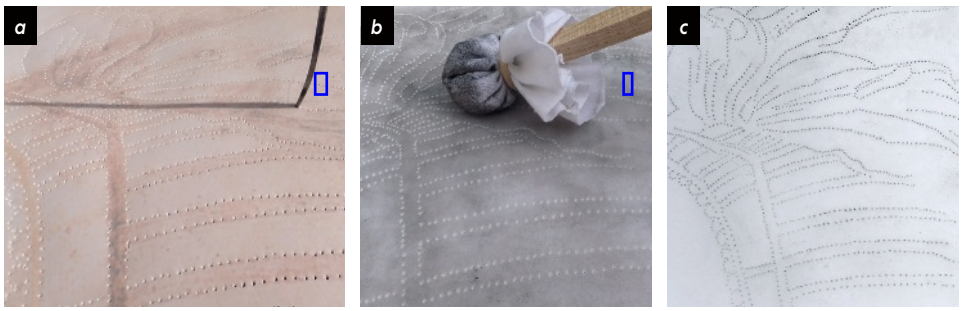




La localisation des trois zones d'intérêt identifiées est indiquée ci-dessus. À la jointure des mains *(à droite, en haut)*, la vue en couleurs *(a)* et l'image infrarouge *(b)*, à 1 000 nanomètres de longueur d'onde, ne permettent pas de détecter le *spolvero*, alors que le traitement LAM le met en évidence sans ambiguïté *(c)*. Sur le front *(à droite, au milieu)*, l'image LAM révèle une double ligne de points en partie reliés ; la superposition avec l'image en couleurs montre que cette double ligne est décalée par rapport à la démarcation du voile. Au-dessus de la tête *(ci-contre)*, le traitement LAM révèle un dessin intrigant.

© Pascal Cotte

LA TECHNIQUE DU « SPOLVERO »



Perçage du calque posé sur le dessin *(a)*, tamponnage du calque sur le *gesso (b)* et le dessin ainsi transféré sur le support de la peinture à venir *(c)*.

La *spolveratura*, ou technique dite « du *spolvero* », de l'italien *polvere* (« poudre »), consiste à reporter sur le *gesso* (enduit de préparation de la peinture) les principaux détails d'un dessin préparatoire appelée le *cartone* (« carton »).

La première étape consiste à exécuter le dessin sur une feuille de papier. On recouvre ensuite ce dessin, posé sur une surface molle (carton ou tissu) d'une feuille transparente ; à l'aide d'une pointe, on transperce l'ensemble en y faisant des séries de petits trous *(a)*. Cette étape, plus complexe qu'il n'y paraît, requiert des choix artistiques nombreux, ce qui exclut son exécution par un apprenti. Dans la troisième étape, on pose la feuille transparente sur le *gesso* et on tamponne avec un petit pochon rempli de poudre noire, généralement du noir de fumée, ses trous ; les traces du dessin préparatoire sont ainsi transférés sous la forme de petits points noirs *(b et c)*.

Cette technique était utilisée à l'époque de la Renaissance italienne en peinture de chevalet, mais également pour les fresques et les peintures murales. Elle permet aussi de reporter de multiples fois une même composition. Elle porte en français le nom de « poncif ».

Le *cartone* d'*Isabelle d'Este*, de la main de Léonard de Vinci, aujourd'hui au Louvre, ainsi que le *cartone* de *La Joconde nue* (auteur non identifié) du château de Chantilly sont deux exemples caractéristiques. De nombreux trous contournent les mains, le visage, le nez, la bouche, les bords des membres et des vêtements, mais il n'y a aucune marque de poudre noire du transfert. Cela suggère soit qu'ils ont été percés mais non utilisés, soit qu'il ait été fait usage d'une feuille de transfert intermédiaire.

> Lisa. Cela indique que dans le projet initial de Léonard de Vinci, le visage était orienté davantage vers la droite. Le *spolvero* marque une double ligne ainsi que des petits traits de jonctions en diagonale. Peut-être s'agissait-il d'une broderie, comme sur le front du modèle dans le *Portrait de Maddalena Doni* (ou *Maddalena Strozzi*), par Raphaël (*voir la figure page 44*), dont la posture rappelle fortement celle de *La Joconde*. Peint à la même époque et également à Florence, ce portrait témoigne des règles vestimentaires des dames de la bourgeoisie florentine.

UN PETIT DESSIN ÉNIGMATIQUE

La technique LAM a également mis en évidence un petit dessin initial au-dessus de la tête et détaché de celle-ci (*voir la figure page 45*). Manifestement, le projet a été abandonné par Léonard. Il pourrait s'agir d'une tête d'aiguille à cheveux. Pourtant, les historiens du costume sont formels: aucune aiguille à cheveux n'était de règle dans la ville de Florence entre 1503 et 1510, période probable à laquelle *La Joconde* a été peinte. Les cheveux étaient au contraire enfermés dans un filet et plaqués sur la tête. On trouve des représentations de coiffures avec des draperies et des aiguilles pour les maintenir, mais uniquement pour des personnages irréels tels que des madones, des allégories ou des déesses, comme nous l'a précisé Elisabetta Gnignera, historienne du costume et autrice de nombreux ouvrages sur les modes de la Renaissance italienne. Le petit dessin initial de Léonard de Vinci reste donc énigmatique.

Comme pour la réflectographie infrarouge, la technique LAM devient moins performante quand la couche picturale est très absorbante. La détection du *spolvero* sur des zones très sombres du tableau est moins évidente. Pour éviter les faux positifs qu'engendre toute technique de détection, l'interprétation des images LAM doit se faire en collaboration avec des experts des techniques picturales, et en complémentarité avec d'autres méthodes existantes d'analyse des œuvres d'art.

Les données multispectrales de *La Joconde* continuent d'être analysées. Elles révéleront peut-être d'autres informations cachées dans la profondeur des couches picturales. Outre les résultats sur *La Joconde*, la technique LAM a également permis de discriminer différentes écritures d'un palimpseste. Rappelons en effet qu'une page de parchemin pouvait être grattée ou lavée pour être réutilisée; parfois certaines écritures persistent, imprégnées dans le parchemin, mais restent difficiles à lire. Or les images LAM éliminent les textes récents en surface pour isoler les textes anciens imprégnés, avec un taux de réussite supérieur à toutes les autres techniques testées. L'imagerie LAM ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour l'analyse et l'interprétation d'œuvres d'art ou de documents archéologiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Cotte et L. Simonot, **Mona Lisa's spolvero revealed**, *Journal of Cultural Heritage*, en ligne le 26 août 2020.

V. Delieuvin et L. Frank, **Léonard de Vinci**, catalogue de l'exposition au Louvre 24 octobre 2019-24 février 2020, Hazan, 2019.

M. Menu *et al.* (dir.), **Au cœur de la Joconde**, Gallimard/Musée du Louvre, 2006.

P. Cotte et D. Dupraz, **Spectral imaging of Leonardo Da Vinci's Mona Lisa : A true color smile without the influence of aged varnish**, dans *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, Society for Imaging Science and Technology, 2006, pp. 311-317.

© Pascal Cotte

UN

NE MEURT JAMAIS.

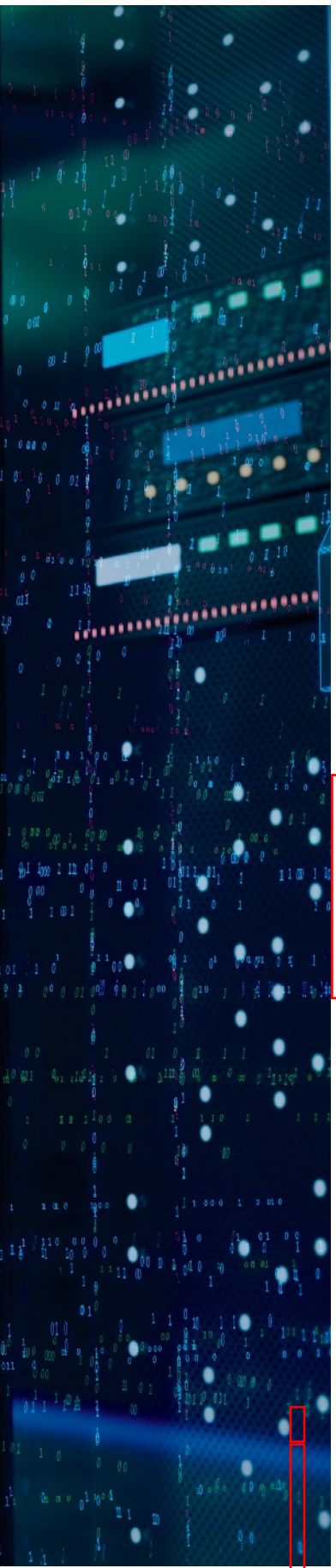
EN TRIANT VOS JOURNAUX, MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES, PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS DURABLE. PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Le vrai coût énergétique du numérique

Internet et les clouds qui le sous-tendent reposent sur d'immenses centres de données répartis dans le monde. Le plus grand centre de données du monde est un bâtiment de 120 000 mètres carrés (soit environ 17 terrains de football) à Tahoe Reno, dans le Nevada. À terme, il est prévu que le campus, nommé The Citadel, compte 670 000 mètres carrés de centres de données.



© Shutterstock.com/Connect world

L'ESSENTIEL

> Derrière Internet et les objets connectés que nous utilisons se cache une architecture complexe de réseaux, de centres de données et d'équipements terminaux déployés dans le monde entier.

> Toutes ces infrastructures ont un impact environnemental considérable et très complexe à estimer dont on commence à mesurer l'ampleur.

> Des pistes se dessinent pour réduire leur consommation énergétique et informer les usagers sur le vrai coût des équipements qu'ils utilisent.

LES AUTEURS

ANNE-CÉCILE ORGERIE
chargée de recherche du CNRS au sein de l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires, à Rennes

LAURENT LEFÈVRE
chargé de recherche de l'Inria au sein du Laboratoire de l'informatique du parallélisme, à l'École normale supérieure de Lyon

Surfer sur Internet, utiliser une application, regarder une vidéo en streaming, discuter en visio… Toutes ces activités qui paraissent aujourd'hui naturelles à nombre d'entre nous sont loin d'être anodines pour l'environnement.

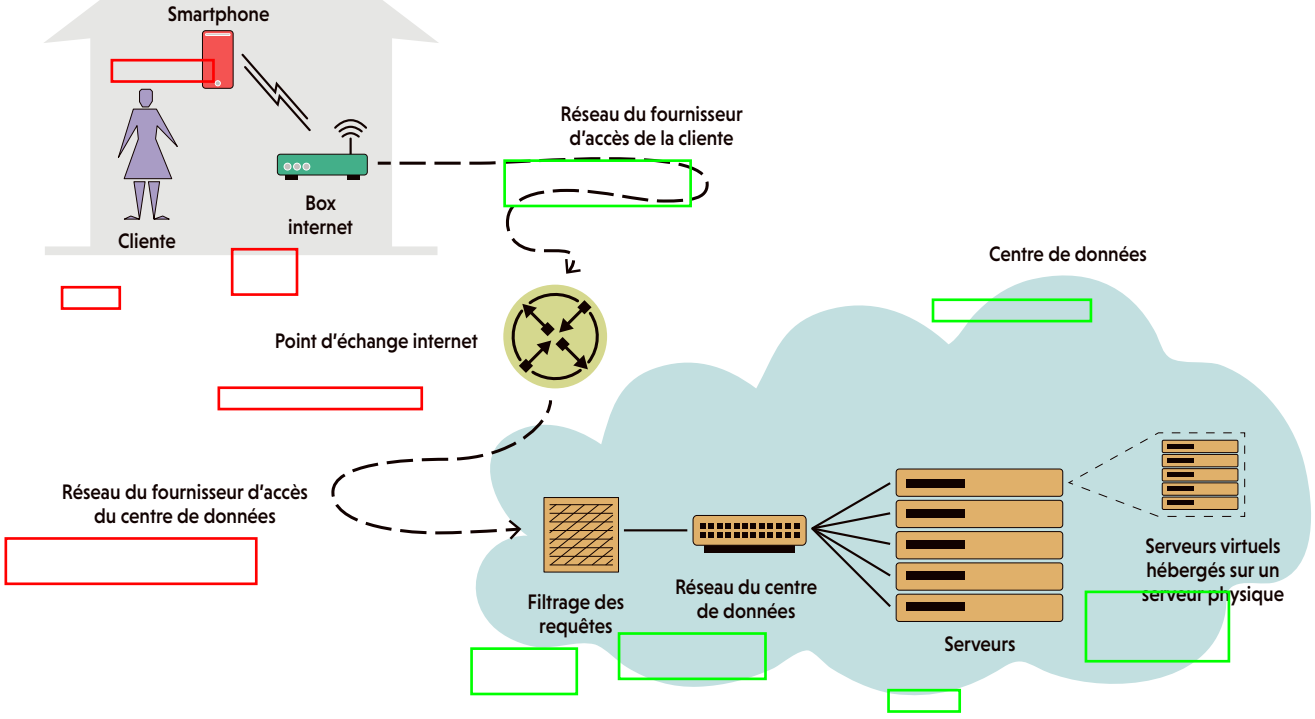
Depuis le début de l'épidémie de Covid-19, et en particulier durant les périodes de confinement, le télétravail a pris une grande importance dans nombre de services publics et d'entreprises. L'usage des transports s'en est trouvé considérablement diminué. Mais peut-on dire pour autant que le télétravail et l'utilisation massive d'Internet qui y est associée ont été bénéfiques pour l'environnement? Plus généralement, quel est l'impact environnemental du numérique? Et comment le diminuer? Répondre à ces questions n'est pas simple. Pour établir l'impact environnemental d'un système numérique, il faut mesurer son coût énergétique. Mais qu'est-ce que cela signifie pour un système aussi complexe et interdépendant qu'Internet?

Né il y a cinquante ans, accessible au grand public depuis une trentaine d'années, Internet est devenu un outil quotidien et indispensable pour quelque 4,5 milliards d'utilisateurs dans le monde, soit un peu moins de 60% de la population mondiale. Son succès planétaire fulgurant a entraîné sa croissance très rapide.

Courriers électroniques, messageries instantanées, moteurs de recherche, réseaux sociaux, stockage dans le cloud, vidéo à la demande en streaming, etc. Les services d'Internet ont évolué au cours du temps, et son architecture s'est étendue et complexifiée pour répondre à cette demande. Internet donne ainsi accès à un monde numérique, électronique, dématérialisé, virtuel… autant d'adjectifs qui lui confèrent un aspect quelque peu magique. Pourtant, ses infrastructures sont bien réelles et consomment de l'énergie et des ressources, très souvent sans que l'utilisateur en ait conscience.

À une époque où dérèglement climatique et épuisement des ressources naturelles interpellent les utilisateurs, les impacts environnementaux d'Internet restent largement méconnus et sont encore peu étudiés. Les études existantes indiquent que ces impacts sont considérables et préoccupants, aussi bien en termes de consommation énergétique, de consommation de matières premières ou d'empreinte carbone. Mais ces études brossent des tableaux variés, avec des chiffres différant parfois fortement de l'une à l'autre.

En 2014, Vlad Coroamă, de l'université technique de Lisbonne, et Lorenz Hilty, de l'université de Zurich, ont ainsi observé, en examinant les articles parus les dix années précédentes sur le coût énergétique d'Internet, une grande disparité des estimations, avec des différences allant jusqu'à quatre ordres de grandeur. En cause, les incertitudes sur les mesures, les approximations faites sur les modèles, mais aussi le périmètre choisi pour l'évaluation: les résultats varient considérablement selon que l'on prend en compte ou non les objets terminaux qui utilisent Internet. C'est pourquoi il est si compliqué de >



> déterminer si le télétravail est bénéfique pour l'environnement ou même simplement si une requête internet coûte autant que trois heures ou dix minutes de bouilloire…

Cependant, depuis quelques années, différentes équipes dans le monde, dont la nôtre, décortiquent les interdépendances d'Internet ou des systèmes qui constituent ce réseau. L'idée est de préciser leur consommation énergétique, de définir des indicateurs pertinents d'efficacité pour ces systèmes et, à partir de là, d'en déduire des solutions pour réduire leur consommation. De nombreux obstacles restent à franchir, mais des pistes commencent à se dessiner.

UNE ARCHITECTURE GIGANTESQUE

Pour saisir la complexité de la question de l'impact environnemental d'Internet, il est nécessaire de comprendre quels sont les systèmes matériels et logiciels impliqués dans son fonctionnement, comment ces systèmes sont utilisés et quelles sont les corrélations entre utilisation, consommation électrique et consommation de matières premières.

Lorsqu'un internaute génère une requête à destination d'un moteur de recherche, il mobilise différents équipements matériels, physiques et virtualisés, et des infrastructures logicielles. Le matériel mobilisé comporte un équipement terminal (PC, smartphone, tablette) pour générer la requête et recevoir les résultats de la recherche, un ensemble de réseaux pour transporter les paquets de données et plusieurs serveurs d'un centre de données pour traiter la requête.

Le traitement d'une requête sur un moteur de recherche mobilise des ressources matérielles sur un smartphone, une box internet, des réseaux, des routeurs, un pare-feu, les équipements réseaux d'un centre de données et un serveur. Ces équipements matériels seront utilisés dans le sens retour pour rapatrier le résultat de la recherche. De plus, des applications, services et protocoles logiciels sont déployés dans chacun des équipements traversés. Plusieurs serveurs peuvent être mobilisés en parallèle pour calculer et agréger les résultats afin d'augmenter la rapidité de la réponse. De même, d'autres serveurs peuvent contribuer à la génération de la requête en récupérant chaque lettre tapée dans la barre de recherche pour afficher des suggestions de recherche. Enfin, une page web donnée peut faire appel à plusieurs services : publicité ciblée, authentification des utilisateurs, affichage d'informations en temps réel provenant de divers fournisseurs de contenus, etc.

Les services logiciels mis en œuvre sur les serveurs sont placés dans des machines virtuelles ou des conteneurs logiciels – l'émulation d'un environnement complet associé à l'utilisateur, où celui-ci peut lancer ses applications et qui lui garantit certaines protections de sécurité et des performances. À l'heure où les services internet se trouvent dans des clouds – des ensembles de serveurs, de réseaux et de logiciels répartis dans le monde –, les serveurs et réseaux utilisés ne sont pas connus des utilisateurs, mais choisis par les fournisseurs de services en fonction de métriques de performance, d'équilibrage de charge entre serveurs et de qualité de service. Le chemin réseau parcouru par la requête de l'utilisateur est donc très variable et son impact environnemental dépend du lieu d'hébergement des serveurs utilisés (*voir la figure ci-dessus et l'encadré page 51*).

Les vidéos poussent cette logique de fonctionnement à l'extrême. Selon le rapport *Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne*, publié en 2019 par The Shift Project, un *think tank* français qui réfléchit à des pistes pour parvenir à « une économie libérée de la contrainte carbone », les flux de données vidéo représentent 80 % du trafic mondial qui circule sur Internet. Ces flux sont majoritairement composés de vidéos en ligne (vidéos à la demande, pornographie, etc.) et en direct (télésurveillance, vidéoconférences).

Alors que les techniques de diffusion hertziennes reposent sur du *broadcast*, c'est-à-dire une diffusion d'un unique émetteur vers beaucoup de récepteurs, la vidéo sur Internet exploite fortement des échanges de type « un >

© Adèle Gallé

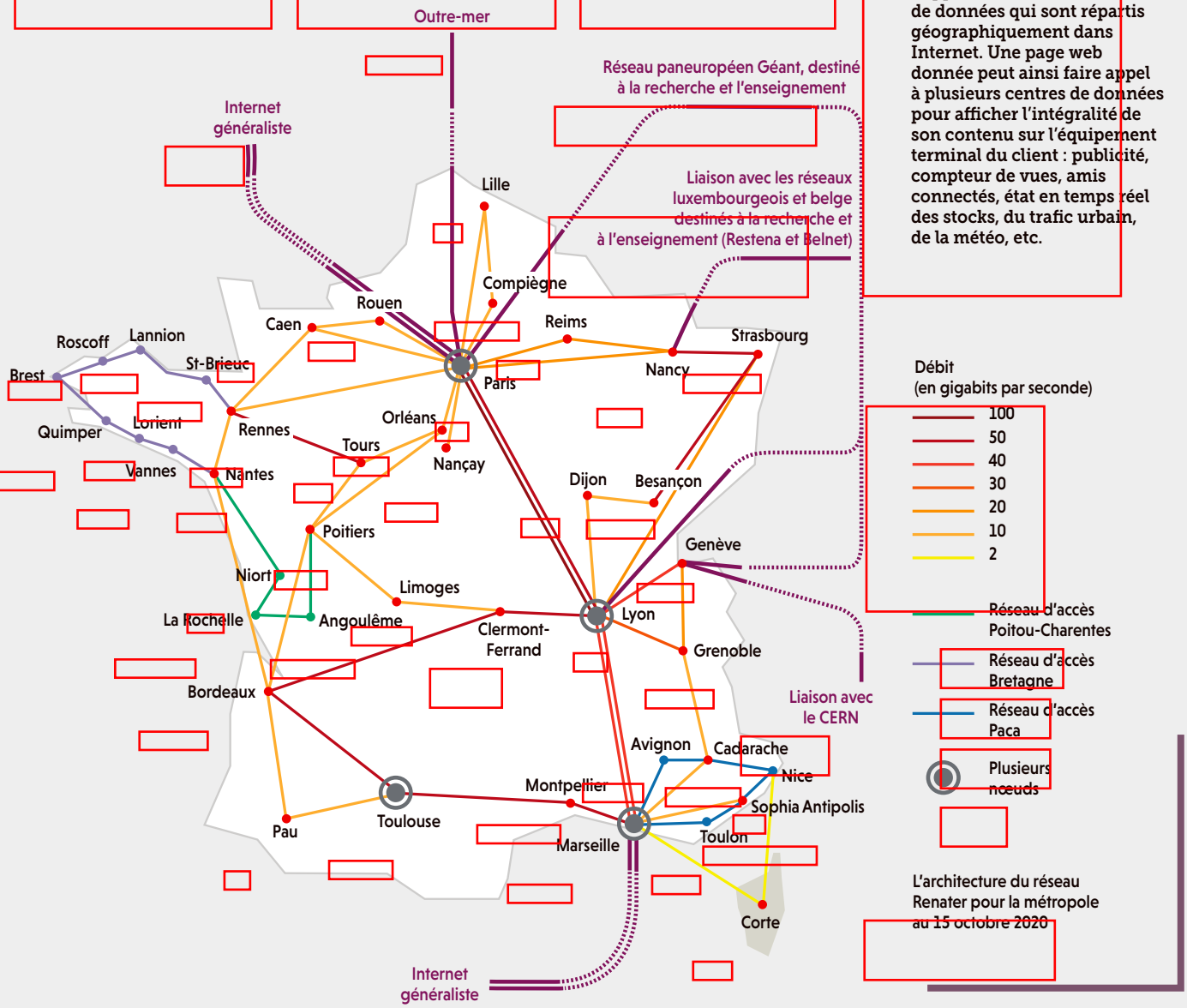
UN EXEMPLE DE RÉSEAU D'INTERNET

Internet est un réseau de réseaux qui interconnecte des millions d'entités indépendantes (fournisseurs d'accès à Internet, réseaux d'entreprises, réseaux universitaires, réseaux gouvernementaux, etc.) pour échanger de l'information. Il permet ainsi à chaque utilisateur d'accéder librement à l'information suivant un de ses principes fondateurs : la neutralité du réseau. Ce principe, qui n'est pas suivi dans tous les pays, garantit l'égalité de traitement de tous les flux de données sur Internet, sans discrimination sur l'émetteur, le récepteur ou le contenu de l'information transmise. Une donnée transite ainsi entre les différents réseaux d'Internet pour atteindre sa destination.

Le réseau Renater, par exemple, fournit un accès internet aux établissements d'enseignement et de recherche en France *(voir la figure)*. Une donnée transitant de Nantes à Marseille peut passer par Bordeaux, Clermont et Lyon ou par Rennes, Paris et Lyon. Comme pour le réseau routier, suivant l'état du trafic, une même donnée, renvoyée à un autre moment, peut emprunter un chemin différent du chemin initial. Ces redondances assurent la qualité et la robustesse du réseau : elles permettent de transporter plus de données sur certaines parties du réseau, d'utiliser un autre chemin en cas de panne d'un lien et d'équilibrer la charge entre les liens très demandés.

Les autres réseaux généralistes d'Internet sont accessibles *via* deux accès, l'un au nord, l'autre au sud. Ainsi, si un ordinateur situé à Rennes et connecté au réseau Renater envoie une donnée à un autre ordinateur situé à Rennes, mais connecté à un autre réseau (Orange, Free, SFR, Bouygues…), la donnée transite d'abord jusqu'à l'accès nord du réseau Renater (*via* Paris) pour rejoindre le réseau de l'ordinateur de destination, avant de revenir à Rennes en empruntant les routes de cet autre réseau. Et si le réseau de l'ordinateur destinataire n'est pas connecté à l'accès nord du réseau Renater, la donnée passe soit par l'accès sud si le réseau destinataire y est raccordé, soit *via* un autre réseau connecté à la fois à l'accès nord de Renater et au réseau de l'ordinateur destinataire. Les données font ainsi souvent des trajets plus longs que ce que l'on imagine.

Les réseaux d'Internet permettent l'acheminement des données depuis leurs émetteurs jusqu'à leurs destinataires. Ces données peuvent avoir des formes multiples : page web, e-mail, vidéo, image… Le traitement et le stockage de ces données, nécessaires au fonctionnement des services internet, s'appuient sur des centres de données qui sont répartis géographiquement dans Internet. Une page web donnée peut ainsi faire appel à plusieurs centres de données pour afficher l'intégralité de son contenu sur l'équipement terminal du client : publicité, compteur de vues, amis connectés, état en temps réel des stocks, du trafic urbain, de la météo, etc.



L'architecture du réseau Renater pour la métropole au 15 octobre 2020

© Adèle Gallé, d'après https://pasillo.renater.fr/weathermap/weathermap_metropole.html (vu le 15/10/20)

CALCULER L'IMPACT D'UN CYCLE DE VIE COMPLET

INTERNET : DES MATÉRIELS HÉTÉROGÈNES QUI ONT DES IMPACTS

Chaque étape de la vie d'un équipement compte dans l'évaluation de son impact environnemental.

FABRICATION

- Les matières utilisées dans les procédés de fabrication : quantités et poids, impacts dus à l'extraction ou la fabrication, provenance et transport
- Les produits chimiques impliqués dans les procédés de fabrication : impacts dus à leur fabrication, leur usage et leur transport
- Les usines de fabrication et d'assemblage des équipements : consommation énergétique, production de déchets

TRANSPORT

- L'emballage : quantités et poids, matériaux employés
- Le moyen de transport utilisé (bateau, avion, train, camion) et la distance entre le point de fabrication et le point de vente final

FIN DE VIE

- Le type de fin de vie : réutilisation, réparation, recyclage
- La collecte, la déconstruction et le transport des déchets

UTILISATION

- La durée d'utilisation
- Le profil moyen d'utilisation dépendant des caractéristiques matérielles et logicielles de l'appareil et incluant la durée d'utilisation moyenne et le type d'utilisation, le temps passé en mode veille et le temps passé complètement éteint
- La consommation électrique moyenne pour chaque mode d'utilisation (veille, utilisation intensive, utilisation modérée, appareil éteint)
- La maintenance et la réparation
- La provenance de l'électricité : mix énergétique du réseau électrique (énergie carbonée, issue de sources renouvelables, etc.)

Lors de sa fabrication, un équipement nécessite des matières premières, des produits chimiques, des usines d'assemblage, etc. Et avant même cela, il a nécessité de l'énergie et des ressources pour être imaginé, prototypé, testé, conçu et amélioré. Afin d'évaluer l'impact d'un équipement, il est donc indispensable de définir le cadre considéré par l'étude :

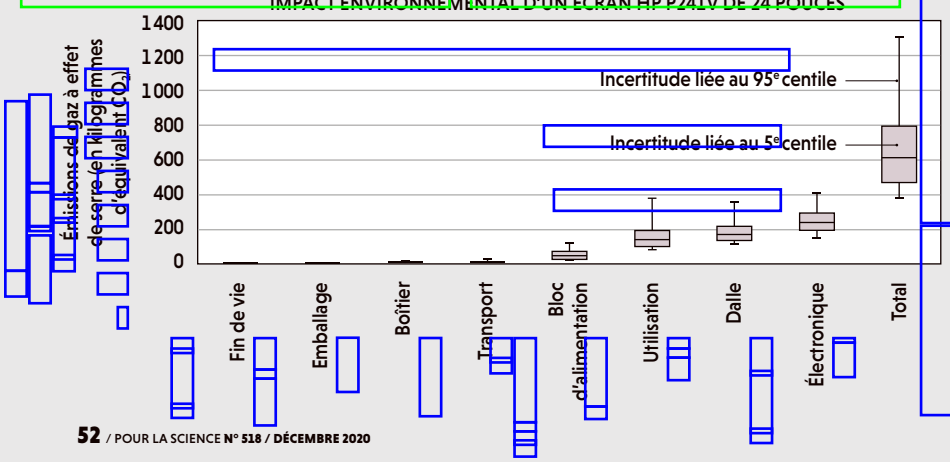
- le périmètre de l'équipement (ou du système) considéré : cela permet de spécifier si l'étude inclut les périphériques, par exemple ;
- la fonction ou utilisation considérée pour cet équipement : un même équipement peut avoir des fonctions très variées. Par exemple, un même modèle d'écran peut être utilisé pour l'affichage des trains en partance dans une gare ou en bureautique ;
- les indicateurs d'impact considérés : consommation énergétique, consommation d'eau, impact CO_2, utilisation de matières premières… Les émissions de gaz à effet de serre sont un indicateur environnemental lié à l'objet considéré. Cet indicateur somme l'ensemble des différents gaz à effet de serre émis lors du cycle de vie de l'équipement en les exprimant en équivalent CO_2 (noté CO_2eq). Pour les gaz à effet de serre autres que le CO_2, cette quantité représente la quantité de CO_2 qui aurait une capacité équivalente à retenir le rayonnement solaire, et donc à participer au réchauffement global de notre planète.

L'organisation internationale de normalisation a standardisé ces analyses de cycle de vie sous les normes ISO 14 040 et ISO 14 044, qui fournissent des directives pour les mener. Dans le contexte des équipements connectés, le cycle de vie se décompose en quatre phases : fabrication, transport, utilisation et fin de vie, chacune avec de nombreux paramètres *(voir ci-dessus)*.

Nombre de paramètres parmi cette liste non exhaustive sont complexes à mesurer, calculer ou estimer, car ils dépendent eux-mêmes de plusieurs autres paramètres. Cette complexité intrinsèque nécessite, pour chaque impact, de préciser toutes les conditions d'étude, car les résultats varient considérablement suivant ces conditions. Par exemple, le transport des équipements produits n'aura pas le même impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre s'il est effectué par bateau ou par avion (l'impact de l'avion par unité transportée est plus important que celui d'un porte-conteneurs). Peu d'entreprises fournissent les données d'analyse de cycle de vie des équipements qu'elles fabriquent et elles sont encore moins nombreuses à indiquer les incertitudes de calcul de ces mesures, lesquelles, pourtant, sont parfois considérables, comme le montre le cas d'un écran externe HP de 24 pouces utilisé cinq ans *(ci-contre)* : l'empreinte carbone de cet écran est en moyenne de 655 kilogrammes de CO_2eq (kg CO_2eq). Mais les marges d'erreur se cumulant, l'incertitude sur ce chiffre total est élevée : de 370 à 1 310 kg CO_2eq selon que l'on considère le 5e ou le 95e centile.

Les émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO_2 sont un indicateur utile pour évaluer l'impact d'un équipement. Mais ce n'est qu'un indicateur parmi d'autres. Il ne donne aucune indication, par exemple, sur l'épuisement des matières premières utilisées pour fabriquer l'équipement ou sur l'empreinte des autres équipements nécessaires au fonctionnement de celui étudié.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN ÉCRAN HP P241V DE 24 POUCES



© Pour la Science - Reproduction interdite

IPAD : L'IMPACT PRÉPONDÉRANT DE LA FABRICATION

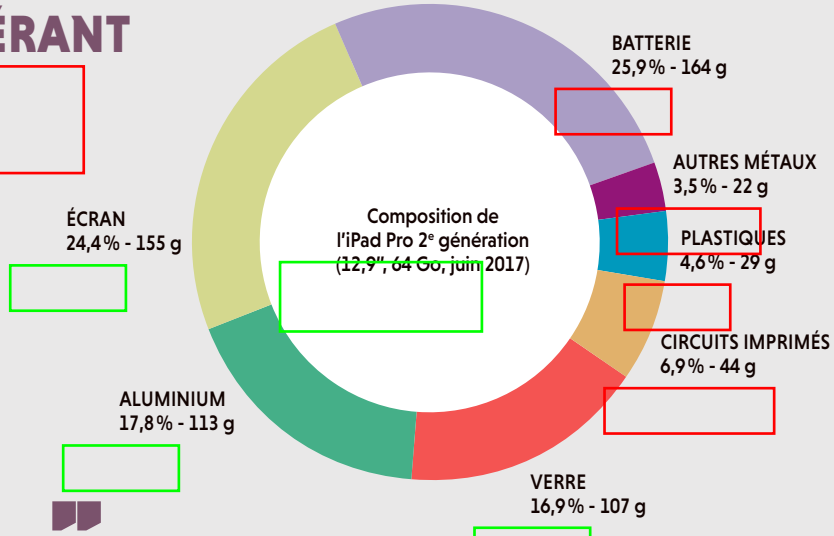
La phase d'utilisation est loin d'être la plus nocive pour l'environnement…

Les émissions de gaz à effet de serre associées aux différentes étapes du cycle de vie des tablettes iPad fournissent des indications assez claires sur les moyens d'action des utilisateurs pour limiter l'impact environnemental de ces objets, comme l'illustre la figure ci-dessous, rassemblant les données d'Apple pour des iPad de différentes générations.

Pour les tablettes considérées, le transport représente de 3 à 11 % des émissions totales. L'utilisation, quant à elle, est principalement influencée par la durée d'utilisation, ici supposée être de trois ans, et la provenance de l'électricité utilisée : une source d'énergie renouvelable émet moins de CO_2 qu'une centrale à charbon, par exemple. Sur les tablettes présentées, on note qu'entre 6 et 14 % des émissions de gaz à effet de serre concernent la phase d'utilisation, contre 79 à 88 % pour la phase de fabrication. Ainsi, l'impact de la fabrication est tel que faire durer les équipements le plus longtemps possible est primordial.

Le principal levier dont dispose un utilisateur pour réduire l'impact lié à cet objet connecté consiste donc à allonger sa durée de vie. Même si la génération suivante de l'objet présente une meilleure efficacité énergétique en phase d'utilisation, l'impact environnemental de sa phase de fabrication restant largement prépondérant, il est préférable de garder l'ancien modèle plutôt que d'acquérir le nouveau.

On remarque ainsi qu'une plus petite taille d'écran correspond à moins de matériaux et donc à des émissions totales de gaz à effet de serre moins élevées. Cependant, à taille d'écran identique, l'empreinte carbone peut aller du simple au double, par exemple entre le modèle de septembre 2015 (première génération de l'iPad Pro) et celui de juin 2017 (deuxième génération de l'iPad Pro).

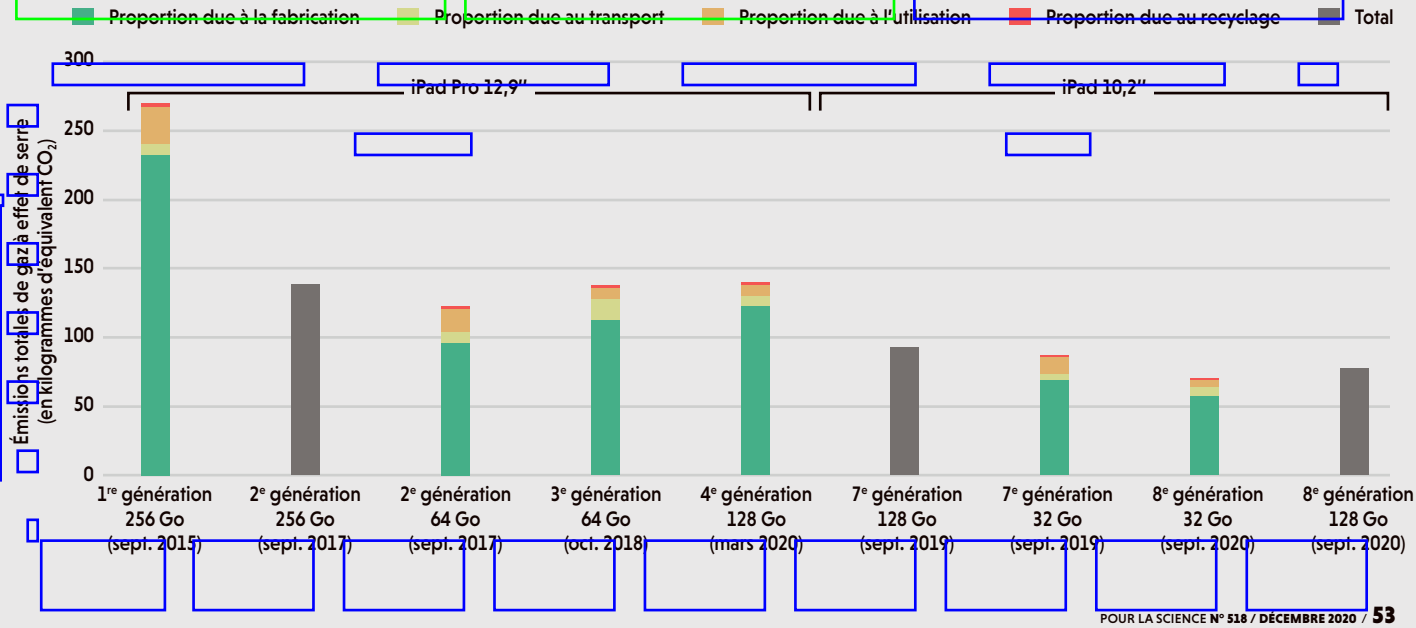


79 à 88 % des émissions liées à ces tablettes concernent leur fabrication

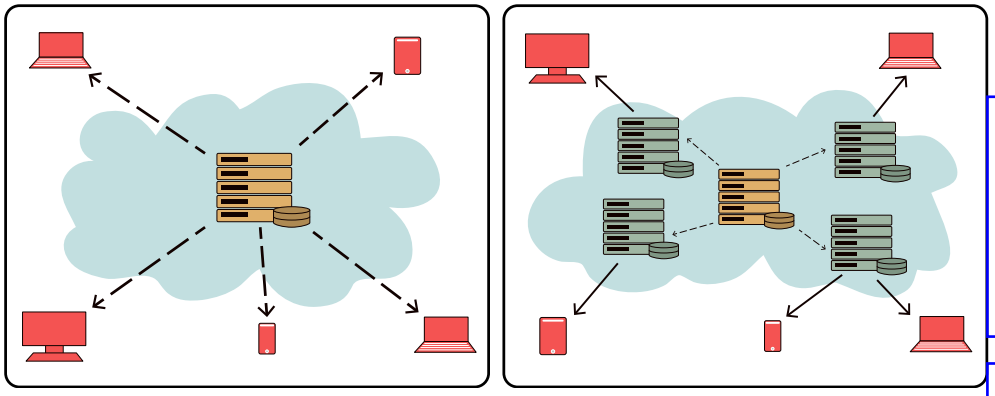
Les constructeurs font des efforts pour diminuer l'empreinte carbone des équipements qu'ils fabriquent. Cependant, ce n'est souvent pas le premier critère considéré dans les choix technologiques, comme le montre l'augmentation de l'empreinte entre le modèle de juin 2017 (deuxième génération de l'iPad Pro) et celui d'octobre 2018 (troisième génération de l'iPad Pro).

L'impact considérable de la fabrication est notamment dû aux nombreux matériaux nécessaires à cette phase (*ci-dessus*). Les éléments chimiques rencontrés dans un iPad sont nombreux : aluminium, carbone, oxygène, fer, cuivre, silicium, cobalt, hydrogène, chrome, nickel, zinc, lithium, magnésium, étain, pour ne citer que les principaux. Un élément peut être présent en très faible quantité et avoir en même temps un impact important du fait de sa rareté, de sa difficulté d'extraction, de sa localisation géopolitique à l'état naturel ou encore des difficultés à le recycler. Aussi, ni les émissions de gaz à effet de serre ni le poids de l'objet ne traduisent ses impacts sur les ressources.

Les données sur l'utilisation des ressources sont difficiles à obtenir du fait des secrets industriels de fabrication et de la complexe imbrication des éléments dans les composants assemblés pour fabriquer des équipements numériques. De plus, certains composés chimiques ne sont utilisés que lors de la phase d'extraction des ressources ou d'assemblage et n'apparaissent pas dans l'équipement final. De nombreuses améliorations demeurent à explorer pour réduire l'impact de la fabrication des équipements numériques, accroître leur durée de vie, améliorer leur réparabilité et faciliter leur recyclage.



© Pour la Science, d'après Apple Environmental Product Reports 2015, 2017, 2019, 2020 (en bas) ; Pour la Science, d'après Apple iPad Product Environmental Reports 2017 (en haut)



Les plateformes de vidéo en ligne comme Netflix n'utilisent pas une architecture traditionnelle client-serveur *(à gauche)*, où un serveur central fournit les données à de multiples utilisateurs, mais une architecture de type CDN *(à droite)*, où les données sont répliquées dans plusieurs serveurs dans le monde qui les rapprochent géographiquement des utilisateurs.

> émetteur vers un récepteur», où un flux de données est généré pour chaque utilisateur. Ce type d'échange accroît le trafic réseau proportionnellement au nombre d'utilisateurs, là où la diffusion hertzienne n'était pas dépendante du nombre d'utilisateurs, mais uniquement du nombre de contenus visibles simultanément à un instant donné.

À cause de ce trafic colossal et afin d'améliorer la diffusion de flux vidéo en ligne, les grandes plateformes ne peuvent pas utiliser des architectures centralisées traditionnelles de type client-serveur, comme pour les pages web. Au contraire, elles reposent sur des infrastructures de type CDN (pour *content delivery network*, «réseau de diffusion de contenu») où les données vidéo sont répliquées aux bons endroits dans les infrastructures mondiales, au cœur des réseaux et dans des centres de données, et géographiquement proches des utilisateurs (*voir la figure ci-dessus*).

Ces infrastructures redondantes, à hautes performances, permettent d'assurer un meilleur équilibre de la diffusion vidéo à l'échelle mondiale et de réduire l'usage des capacités du réseau de cœur (le réseau central sur lequel les autres reposent) sur de longues distances. Ce mode de distribution de contenu implique cependant qu'une vidéo donnée soit présente en de multiples exemplaires et formats, à de nombreux points du globe, à chaque instant, pour assurer une diffusion optimisée. Il mobilise ainsi un nombre colossal de serveurs dans des centres de données. Ainsi, en 2018, Timm Böttger et ses collègues, de l'université Queen Mary de Londres, ont estimé que Netflix utilisait au moins 8500 serveurs de distribution de contenu localisés dans plus de 600 centres de données, ces derniers n'appartenant pas à Netflix, mais à des opérateurs de réseaux.

On le voit, une donnée numérique, quelle qu'elle soit, traverse donc de nombreux équipements informatiques. On divise le monde matériel d'Internet en trois parties: les réseaux (filaires et sans fil), les centres de calcul et de données (qui hébergent les serveurs), et les terminaux des utilisateurs (smartphones, tablettes, ordinateurs, objets connectés, etc.). Chacun de ces équipements génère des impacts sur l'environnement tout au long de sa vie (*voir l'encadré pages 52-53*).

UN RÉSEAU DE COMMUNICATION MONDIAL

L'impact des seuls réseaux de communication sur lesquels repose Internet est loin d'être négligeable. Ils sont hétérogènes, se partageant entre fils de cuivre, fibres optiques et réseaux sans fil. Toutes ces infrastructures s'appuient sur des équipements embarquant une fraction variée d'intelligence (routeurs, commutateurs, antennes, box…), chacun ayant son propre impact environnemental et sa propre durée de vie.

Par ailleurs, les opérateurs assurent une couverture nationale de plus en plus importante. Les technologies sans fil, notamment, >

EN CHIFFRES

4,4 MILLIARDS

En 2019, on estime qu'il y avait environ 4,4 milliards d'utilisateurs d'Internet dans le monde.

4 À 10 %

En 2019, le numérique (en prenant en compte le cycle de vie des équipements) aurait été responsable de 4 à 10 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

10 À 15 %

En 2019, le numérique aurait consommé 10 à 15 % de l'électricité mondiale.

15 À 34 MILLIARDS

En 2019, le numérique aurait compté entre 15 et 34 milliards d'équipements terminaux répartis entre 4,4 milliards d'utilisateurs dans le monde, soit entre 3 et 8 par personne en moyenne.

5G : LA GRANDE INCONNUE

Alors que la 5G s'apprête à être déployée en France, son impact environnemental reste difficile à évaluer, car encore peu d'infrastructures réelles existent. Quelques estimations provenant de Chine, où la technologie vient d'être massivement déployée (fin juin 2020, l'opérateur China Mobile avait déjà mis en service 188 000 stations 5G dans 50 villes de Chine), suggèrent que la puissance consommée par une station 5G serait deux à trois fois plus élevée que celle consommée par une station 4G. À cela s'ajoutent le coût énergétique de fabrication des antennes 5G, de plus faible portée et donc plus nombreuses, la construction de smartphones compatibles et l'explosion d'objets connectés que la 5G va entraîner. À partir de quel seuil les avantages énergétiques qu'elle pourra fournir compenseront-ils ces effets néfastes ? C'est toute la question qu'il reste à explorer.

© Adèle Gallé

COMBIEN CONSOMME UNE BOX INTERNET ?

La consommation d'une box internet (le boîtier internet qui permet de connecter un foyer à Internet par la technologie ADSL ou fibre optique) illustre la non-proportionnalité énergétique des équipements numériques : lorsque le trafic réseau, et donc l'activité de l'équipement, est très faible, sa consommation est loin d'être négligeable, comme le montre la figure ci-dessous. Par exemple, aux alentours de 4 heures du matin, le trafic est quasiment nul, mais la box consomme environ 15 watts. On nomme cette valeur « consommation statique » : il s'agit de la puissance consommée lorsque l'équipement est allumé, mais n'est pas utilisé et n'a donc pas de charge de travail. La partie restante est nommée « partie dynamique » et dépend de l'utilisation de l'équipement.

Cette non-proportionnalité, combinée à la variabilité de l'utilisation, complexifie le calcul d'un coût énergétique pour cet équipement. Par exemple, si l'on souhaite calculer un coût de consommation énergétique par bit traité, plusieurs options sont envisageables.

Coût dynamique instantané : cette méthode fait l'hypothèse que la box est toujours allumée et ne considère que la partie de la consommation qui dépend de l'utilisation, c'est-à-dire, dans notre exemple, la partie au-dessus de 15 watts. Ainsi, pour calculer le coût à 8 heures du matin, on considère qu'il faut 0,15 watt (uniquement la partie dynamique) pour un débit de 0,65 mégabit par seconde (Mbps). Ces valeurs donnent un coût énergétique de 0,23 microjoule par bit : chaque bit induit une consommation supplémentaire de 0,23 microjoule.

Coût instantané total : cette méthode considère la consommation instantanée totale de la box incluant la partie statique, soit 15,15 watts pour 0,65 Mbps à 8 heures du matin, par exemple. Ces valeurs correspondent à un coût de 23,3 microjoules par bit. Si l'on calcule ce coût à un autre moment, par exemple à 20 heures, où on a une consommation de 16,05 watts pour 4,75 Mbps, le coût est alors de 3,38 microjoules par bit. Le coût instantané total varie donc fortement suivant le trafic : un bit n'induit pas la même consommation suivant le moment de la journée où il est traité.

> **À 4 heures du matin, le trafic est quasi nul, mais la box consomme environ 15 watts**

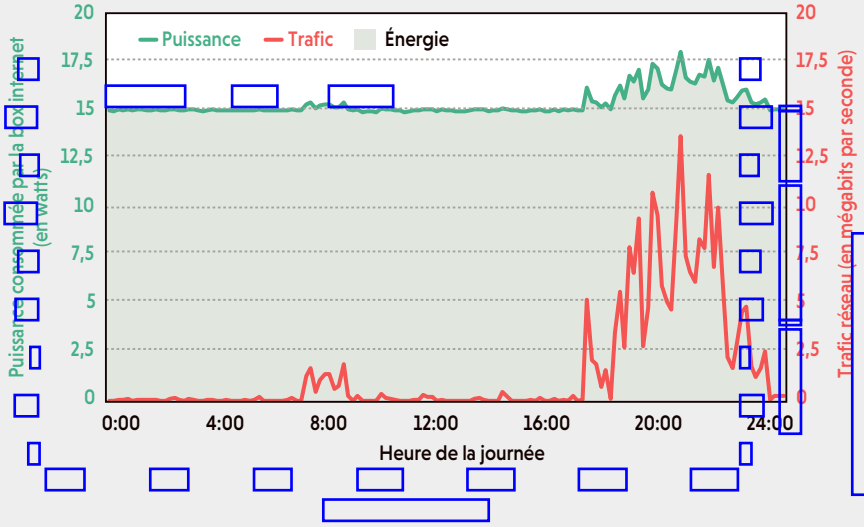
Coût journalier total : cette méthode considère la consommation moyennée sur la journée, soit 15,35 watts pour 1,55 Mbps en moyenne. Le coût est alors de 9,9 microjoules par bit. Le trafic variant d'un jour à l'autre, cette méthode indiquera un coût différent en fonction de l'utilisation moyenne pour chaque jour.

Coût minimal total : cette méthode considère les valeurs maximales jamais observées sur la box, en l'occurrence 25 watts pour 60 Mbps. Le coût est alors de 0,42 microjoule par bit. Cette valeur est théorique puisque la box ne fonctionne pas à pleine capacité à chaque instant. Elle constitue donc une borne inférieure théorique de la consommation totale induite par le traitement d'un bit sur la box.

Comme on peut le voir à travers cet exemple, la méthode de calcul influe considérablement sur la valeur finale : on observe jusqu'à deux ordres de grandeur de différence suivant la méthode choisie. Ce choix dépend de l'utilisation que l'on souhaite en faire : calculer le surcoût lié au traitement de données, comparer l'efficacité de deux équipements, calculer la consommation de l'émission d'un e-mail, etc. Ce type d'indicateur de coût est indispensable pour estimer l'efficacité énergétique d'un équipement.

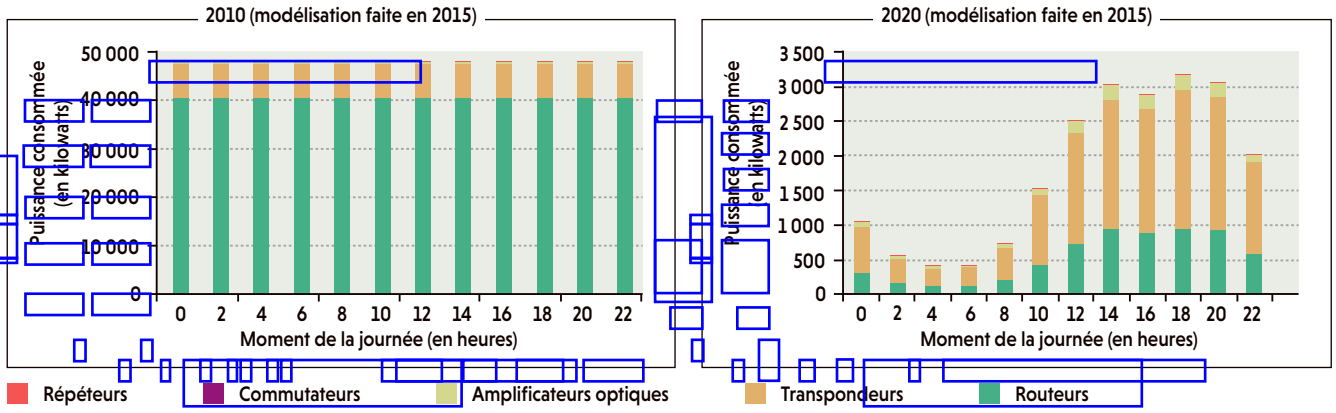
La non-proportionnalité énergétique observée ici pour une box touche en fait tous les équipements numériques dans une proportion plus ou moins forte. Dans le cas de notre box, le poids de la partie dynamique atteint au maximum 40 % de la puissance consommée, puisque la box consomme au maximum 25 watts pour une partie statique de 15 watts. Mais cette proportion dynamique maximale peut descendre jusqu'à moins de 10 % pour certains équipements comme les routeurs du cœur d'Internet, dont la consommation varie très peu en fonction de l'utilisation.

Pour ces équipements déjà en service, une façon efficace d'économiser de l'énergie consiste à les éteindre lorsqu'ils ne sont pas utiles. Dans le cas de la box, l'éteindre pendant la nuit, lorsqu'elle n'est pas utilisée, permettrait d'économiser 15 watts pendant toute la durée de la nuit, soit environ 38 kilowattheures d'électricité par an (l'équivalent de la consommation annuelle d'un microondes selon l'Ademe), si l'on considère des nuits de 7 heures. C'est une petite économie en termes de coût financier pour un foyer, mais ramené aux millions de box allumées en France, cela représente une réduction énergétique et environnementale non négligeable.



La consommation sur une journée d'une box internet connectée par fibre optique *(en vert, représentée par la puissance instantanée consommée moyennée sur 10 minutes)* n'est jamais nulle, même lorsque la box n'est pas utilisée *(en rouge, la variation du trafic sur la même journée).*

© Anne-Cécile Orgerie/Pour la Science



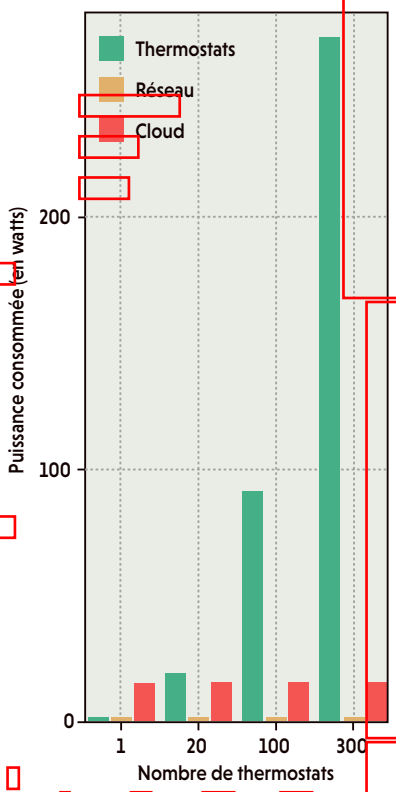
En 2015, le projet de recherche GreenTouch a montré qu'en changeant l'infrastructure des réseaux de communication, il était possible d'améliorer d'un facteur 316 l'efficacité énergétique d'un réseau de communication de 2020 *(à droite)* par rapport à 2010 *(à gauche)* et d'adapter sa consommation à l'heure de la journée tout en tenant compte de l'augmentation du trafic. Le scénario proposé permettrait par ailleurs d'augmenter d'un facteur 10 000 l'efficacité énergétique de l'accès mobile au réseau et d'un facteur 256 celle de l'accès fixe.

> s'empilent et s'enchaînent : 2G, 3G, 4G et actuellement la 5G, en cours de déploiement dans certaines villes (*voir l'encadré page 54*). Or les anciennes technologies demeurent en place pour assurer la compatibilité avec les équipements les plus anciens. Ainsi, au lieu de les remplacer, les nouvelles technologies s'ajoutent à leur liste. De plus, en général, pour bénéficier de chaque nouvelle technologie réseau sans fil, le client doit acquérir un nouvel équipement : mettre au rebut son smartphone et en acheter un autre, ce qui accélère le renouvellement des équipements.

Bien sûr, chaque nouvelle génération de réseaux accroît les capacités de communication : la bande passante disponible par utilisateur est augmentée. Et cette bande passante supplémentaire est effectivement utilisée, augmentant *de facto* la consommation de données. En avril 2020, l'Arcep (l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse) indiquait ainsi dans son rapport pour l'année 2019 qu'en moyenne, en France, la consommation mensuelle par carte SIM était de 7 gigaoctets, toutes cartes SIM confondues, alors que celle des cartes SIM 4G était à elle seule de 9,5 gigaoctets.

Les protocoles qui assurent l'émission et la réception des données dans ces réseaux ont été conçus pour assurer robustesse, performance et qualité de service des réseaux. Ils ne sont pas prévus pour réduire leurs impacts environnementaux. Aussi toutes ces infrastructures constituent-elles un poste important de la consommation électrique du numérique. En particulier, parmi les équipements liés aux infrastructures, les box (ADSL ou fibre optique) et les réseaux wifi sont souvent allumés en permanence chez les particuliers, même lorsqu'ils ne sont pas utilisés, entraînant alors une consommation inutile (*voir l'encadré page 55*).

De 2010 à 2015, le projet de recherche international GreenTouch, qui mêlait instituts académiques et groupes industriels, a démontré qu'il était possible de construire une infrastructure des réseaux de l'internet mondial qui réduirait de 98 % la consommation d'énergie en 2020 par rapport à celle de 2010, et ce en tenant compte de l'explosion du trafic et pour une qualité de service équivalente (*voir la figure ci-dessus*). La quantité d'énergie économisée si ce scénario était appliqué en Amérique du Nord, en Europe et au Japon équivaudrait, en empreinte carbone, aux émissions de gaz à effet de serre de 5,8 millions de voitures. Cette construction impliquerait de nombreux changements structurels et technologiques tant au niveau matériel que logiciel. Il reste aux constructeurs et opérateurs à s'emparer de ces innovations et à les déployer petit à petit dans les infrastructures du web…



Si un seul thermostat connecté consomme moins que le cloud grâce auquel il fonctionne *(à gauche)*, un parc de 300 thermostats répartis dans autant de maisons coûte beaucoup plus cher en énergie que les serveurs qui traitent leurs données *(à droite)*. Le réseau qui connecte les thermostats et le cloud, quant à lui, consomme peu en comparaison *(en jaune)*.

DES CENTRES DE DONNÉES JAMAIS ÉTEINTS

Les centres de données constituent eux aussi une part non négligeable de la consommation énergétique du numérique. Un centre de données est constitué d'un ensemble de serveurs de calculs, de baies de stockage et d'équipements réseaux. Autour de ces systèmes numériques, une infrastructure physique (bâtiments, systèmes de refroidissement, connectivité et redondance électrique) est nécessaire. Différentes techniques de récupération de la chaleur sont aussi expérimentées et, pour certaines, mises en production. Une métrique couramment utilisée, l'indicateur d'efficacité énergétique ou PUE (pour *power usage effectiveness*), permet de calculer le surcoût énergétique de cette infrastructure (principalement en termes de refroidissement). Les hébergeurs de centres de données essaient de s'approcher du PUE idéal (de valeur 1), où l'impact du refroidissement devient négligeable par rapport à la consommation des infrastructures informatiques. Toutefois, cette course au PUE est artificielle, car elle ne

© Pour la Science, d'après GreenTouch Final Results from Green Meter Research Study, 2015 (en haut) ; © Pour la Science, d'après L. Guegan et A.-C. Orgerie, 2019 IEEE International Conference on CloudCom, pp. 287-294, 2019 (en bas)

présume en rien de l'efficacité et de la pertinence des usages informatiques effectués dans les centres de données.

Les gros centres de données (notamment ceux des « Gafam », Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft) sont par ailleurs de plus en plus alimentés par des énergies renouvelables, produites localement ou achetées par contrat énergétique. Mais ils ne fonctionnent pas en autonomie pour autant. Apple, par exemple, annonce que le groupe produit autant d'énergie renouvelable (en grande partie photovoltaïque) qu'il ne consomme d'énergie, toutes sources confondues, mais en pratique il n'en consomme qu'une petite partie, car cette énergie n'est majoritairement disponible que le jour et par beau temps, alors que les centres de données fonctionnent en permanence. Apple revend le reste de sa production d'énergie et rachète ce dont il a besoin pour alimenter ses centres de données durant la nuit.

Or le nombre de ces centres ne cesse de croître. À l'échelle mondiale, on observe non seulement le déploiement continu de gros centres de données, mais aussi d'autres plus modestes pour accompagner l'arrivée de l'internet des objets et garantir ainsi de faibles latences entre les serveurs et les objets connectés. Le principal problème associé aux infrastructures numériques est leur faible proportionnalité énergétique, du fait de leur utilisation très variable. En 2015, l'institut Uptime considérait qu'aux États-Unis, 30 % des serveurs dans les centres de données étaient comateux, c'est-à-dire allumés pour n'effectuer aucun travail. Or on observe que lorsque l'usage d'un serveur diminue, sa consommation électrique ne tend pas vers zéro, mais vers 50 % de sa puissance électrique maximale. Ainsi, lorsqu'un serveur effectue peu de tâches, sa consommation électrique est néanmoins très importante. Cette faible proportionnalité énergétique est encore plus criante sur certains équipements réseaux (commutateurs, routeurs), où la consommation électrique est quasiment constante (100 % du pic électrique) quel que soit l'usage.

Les recherches actuelles sur les centres de calcul visent à consolider la charge autant que possible pour la concentrer sur le plus petit nombre de serveurs possible et ainsi éteindre les serveurs complètement inutilisés à un instant donné. Avec notre collègue Issam Rais, nous avons en effet montré en 2018 qu'il suffit qu'un serveur ne soit pas utilisé pendant trois minutes pour qu'il soit intéressant de l'éteindre. Il s'agit donc de mettre au point des stratégies de consolidation qui comportent à la fois des techniques de prédiction des pics d'utilisation pour rallumer les serveurs à l'avance, des algorithmes pour optimiser le nombre de cycles d'allumage/extinction, gourmands en temps et en énergie, et des mécanismes de migration de machines virtuelles d'un serveur physique à l'autre avec le moins d'impact possible sur les performances perçues par les utilisateurs. D'autres techniques encore visent à contrôler la fréquence et la tension d'alimentation des processeurs pour réduire leur consommation lorsqu'ils ne sont pas utilisés à 100 % ou lorsqu'ils doivent attendre des résultats provenant d'autres processeurs.

UNE FOULE D'OBJETS CONNECTÉS

Les équipements terminaux des utilisateurs, enfin, n'ont rien à envier aux deux autres composantes du numérique en matière de consommation énergétique. En 2018, dans le monde, on comptait environ 9 milliards d'appareils connectés à Internet, dont 2 milliards de smartphones et 1 milliard d'ordinateurs. Le reste est constitué des très nombreux objets connectés qui ont fleuri ces dernières années : ampoules, microondes, brosses à dents, téléviseurs, caméras, enceintes, montres, robots…

La prolifération des objets connectés et leur impact considérable sur l'environnement interrogent les habitudes de consommation et les rapports aux nouvelles technologies : sont-ils des gadgets ou des outils pour mieux vivre ? De la cocotte-minute au capteur de glucose pour personnes diabétiques en passant par la brosse à dents et l'ampoule, difficile de définir des critères objectifs et universels pour quantifier l'utilité de ces objets. Leurs impacts sur l'environnement, cependant, sont quantifiables, comme dans le cas de la tablette (*voir l'encadré page 53*). Cela permet aux consommateurs de comparer les objets de différents >

UNE PISTE POUR OPTIMISER UN RÉSEAU INTELLIGENT

Les réseaux électriques intelligents fonctionnent en général selon une approche centralisée : un équipement maître reçoit les informations de chaque compteur connecté dont il a la supervision. Si l'on souhaite mettre en place une politique d'effacement de charge intelligente et réactive, en cas de surconsommation électrique, l'équipement maître décide des foyers où réduire la consommation afin de repasser en dessous du seuil cible. Dans une approche décentralisée cascadocyclique, les foyers sont virtuellement connectés ensemble par un « anneau à jeton » : ils sont placés dans un ordre arbitraire et se transmettent un jeton. Quand la sonde de courant détecte un dépassement du seuil, elle envoie une information au foyer qui a le jeton, celui-ci décide ou non de baisser un moment sa consommation et transmet le jeton au foyer suivant, etc. L'approche cascadocyclique permet de lisser l'effacement sur l'ensemble des foyers et évite d'avoir recours à un équipement central de décision et de gestion des données des utilisateurs.

> vendeurs… à condition d'avoir des indicateurs pertinents et compréhensibles, comme l'empreinte carbone ou des écolabels tels ceux présents sur les machines à laver.

Une étude d'Apple de 2019 fournit les émissions moyennes de gaz à effet de serre dues à un ordinateur portable : un MacBook Pro possédant un écran de 16 pouces (environ 40 centimètres), un stockage de 512 gigaoctets et un processeur à 2,6 gigahertz. La phase d'utilisation considérée est de quatre ans en première main. Cette étude indique que l'empreinte de l'ordinateur est de 394 kilogrammes d'équivalent CO_2 (kg CO_2eq). Dans ce cas précis, la fabrication concentre à elle seule 75 % de l'empreinte de l'ordinateur portable, le transport 5 %, l'utilisation 19 % et la fin de vie moins de 1 %. Selon ces résultats, il faudrait utiliser cet ordinateur quatre fois plus longtemps (en supposant une utilisation constante dans le temps), soit environ seize ans, pour que son empreinte pendant sa phase d'utilisation soit équivalente à celle de sa phase de fabrication.

Les objets connectés n'échappent pas à ce constat. Par exemple, le thermostat Google Nest, qui ajuste automatiquement le système de chauffage d'une habitation, a une empreinte de 30 kg CO_2eq selon Google. Cette empreinte est calculée pour une utilisation de dix ans. La phase de production représente alors 82 % de cet impact, contre 15 % pour l'utilisation. Il faudrait garder cet équipement environ cinquante-cinq ans pour que son empreinte pendant son utilisation soit équivalente à celle de sa fabrication et donc limiter l'impact de cette dernière. Il est cependant peu probable que la batterie de l'objet tienne aussi longtemps, même si l'étude fait l'hypothèse qu'elle fonctionnera au moins dix ans.

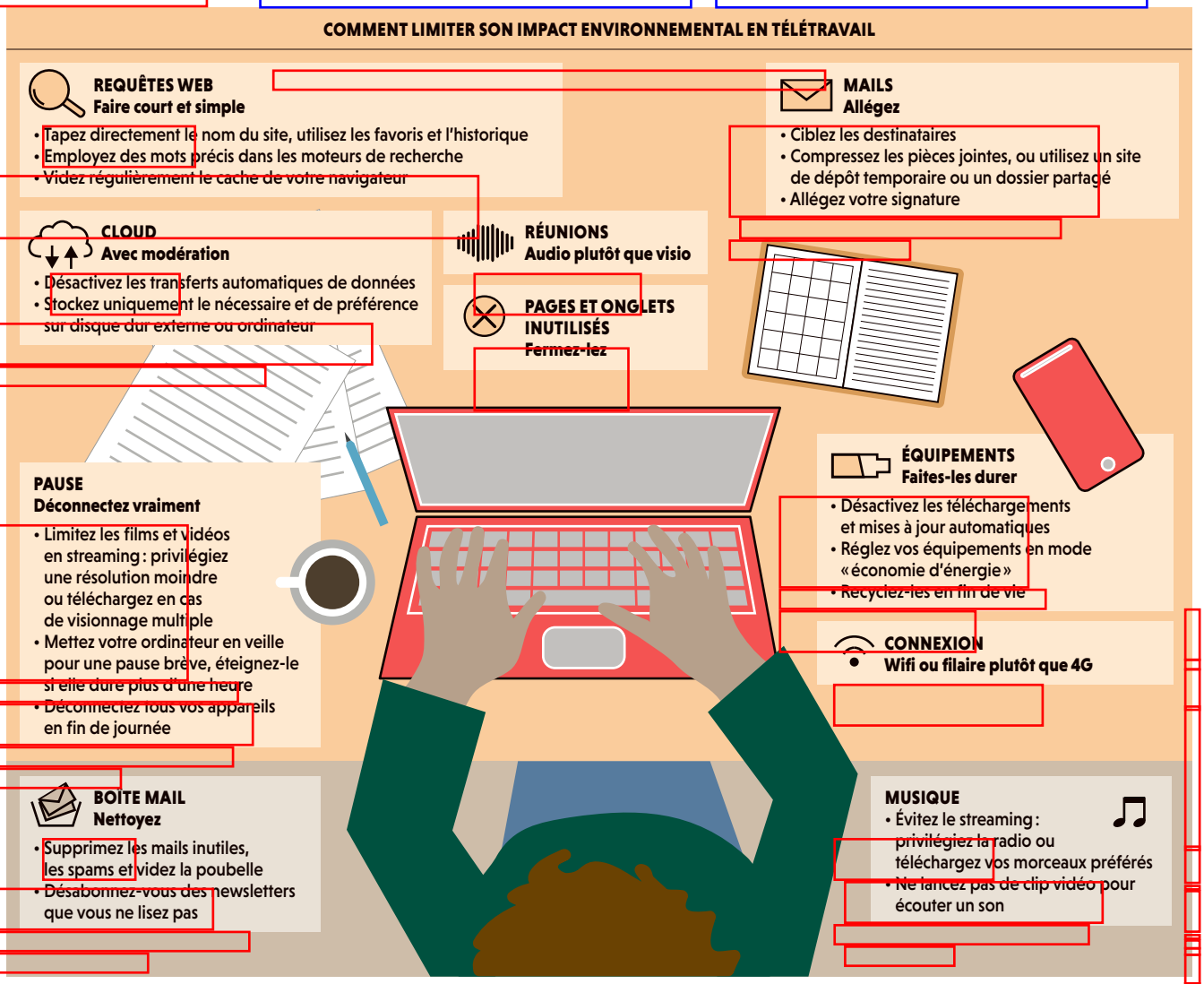
De plus, le principal argument de vente d'un tel objet consiste à réduire la facture électrique de l'acheteur. Il serait donc intéressant que son bilan énergétique soit comparé aux gains énergétiques effectifs qu'il induit. Cependant, pour que cette comparaison soit pertinente, elle doit comprendre non

SUR LE WEB

Projet international GreenTouch :
www.greentouch.org

Projet national EcoInfo :
ecoinfo.cnrs.fr

Rapport *Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne*, The Shift Project, 2019 :
theshiftproject.org/article/climat-insoutenable-usage-video/



© Adèle Gallé ; source : www.ademe.fr/comment-teletravailler-leger

seulement l'énergie consommée par le thermostat tout au long de son cycle de vie, mais aussi celle de l'infrastructure indispensable à son fonctionnement : le réseau d'accès à Internet qu'il utilise pour communiquer et les serveurs du fournisseur de service qui exécutent des algorithmes d'apprentissage et d'optimisation, et stockent les données produites et les historiques. Or ce coût n'est pas pris en compte dans l'empreinte citée plus haut.

En 2019, avec notre collègue Loïc Guegan, nous avons proposé un modèle pour calculer la consommation électrique totale d'un objet connecté. En l'appliquant à une simulation de thermostat de type Google Nest, nous avons ainsi montré que si le cloud gère un petit nombre de thermostats, sa consommation est supérieure à celle de ces derniers. En revanche, dès que le nombre de thermostats dépasse la vingtaine, l'impact des objets devient prépondérant sur celui du cloud (*voir la figure en bas de la page 56*). Or de tels objets sont destinés à être déployés sur des ensembles de plusieurs centaines de maisons. Reste à comparer cette consommation totale aux gains énergétiques que ces objets entraînent.

À l'inverse, la consommation d'autres objets repose beaucoup plus sur le cloud. En 2018, avec d'autres collègues, nous avons ainsi montré que, dans le cas d'une webcam qui transfère ses données par wifi à un serveur du cloud effectuant de la reconnaissance d'images, la partie cloud consomme en moyenne deux fois plus d'électricité que l'objet lui-même. Voire trois fois plus si au lieu d'être constitué de grandes fermes de calcul, comme actuellement Google (qui compte une vingtaine de grands centres de données répartis dans le monde), le cloud est déployé en une multitude de petits centres de données plus proches des utilisateurs, comme cela se développe de plus en plus, notamment en lien avec la 5G.

Nous nous intéressons par ailleurs à d'autres systèmes numériques apparus ces dernières années et faisant intervenir des objets connectés : les « réseaux électriques intelligents ». Ces réseaux de distribution d'électricité utilisent les informations reçues de chaque consommateur à l'aide d'un boîtier (le compteur Linky d'Enedis, en France, par exemple) pour ajuster le flux d'électricité et permettre à terme de mieux gérer les fluctuations de consommation et de production, plus particulièrement la production de sources d'énergie renouvelable. Les fournisseurs d'électricité défendent l'idée que ces réseaux vont permettre de réduire la consommation énergétique, mais sans se préoccuper de la consommation même de ces réseaux. Quel coût énergétique cette intelligence rajoute-t-elle ? Peut-on l'optimiser ?

Très peu d'informations sont disponibles concernant la consommation de ces équipements intelligents. En revanche, il est possible de modéliser la façon dont les données circulent et comment cela impacte les services du réseau électrique. C'est ce que nous avons fait tout récemment avec des collègues sur un boîtier fictif afin d'optimiser l'infrastructure matérielle et logicielle nécessaire pour obtenir des approches d'effacement de charge réactives et efficaces (*voir l'encadré page 57*). Ces approches pourraient finalement permettre de limiter le surdimensionnement des réseaux de distribution d'électricité en atténuant les pics de consommation, liés notamment aux véhicules électriques.

Chacun peut s'engager dès maintenant sur la voie de la sobriété numérique

VERS UNE SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

Ainsi, de nombreuses pistes se dessinent pour réduire les impacts environnementaux d'Internet et sont explorées par les académiques et les industriels. Certaines, comme l'amélioration de la proportionnalité énergétique, le ciblage des gaspillages et l'écoconception matérielle et logicielle, visent à améliorer l'efficacité énergétique. D'autres, comme l'allongement de la durée de vie et de l'usage des équipements ou la conception de métriques rendant compte de l'impact environnemental réel des équipements afin de les rendre comparables, tant pour sensibiliser le grand public que pour informer les pouvoirs publics, tendent vers une sobriété numérique.

Toutes doivent nous aider à nous interroger sur les pratiques de construction d'Internet et sur nos usages. Les accords de Paris sur le climat nous demandent de réduire notre empreinte carbone, et on pense souvent qu'Internet va être la solution. Mais le numérique n'échappe pas à ces accords. Il est indispensable de prendre en compte ses impacts environnementaux, de les maîtriser et les réduire. Et chacun de nous peut s'engager dès maintenant sur cette voie en conjuguant chez soi efficacité énergétique, sobriété numérique et usage raisonné. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Camus *et al.*, **Co-simulation of an electrical distribution network and its supervision communication network**, *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1-6, 2020.

L. Guegan et A.-C. Orgerie, **Estimating the end-to-end energy consumption of low-bandwidth IoT applications for WiFi devices**, *2019 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*, pp. 287-294, 2019.

I. Raïs *et al.*, **Quantifying the impact of shutdown techniques for energy-efficient data centers**, *Concurr. Comp. Pract. Exp.*, vol. 30(17), pp. 1-13, 2018.

Y. Li *et al.*, **End-to-end energy models for edge cloud-based IoT platforms : Application to data stream analysis in IoT**, *Future Generation Computer Systems*, vol. 87, pp. 667-678, 2018.

L'ESSENTIEL

> Les vents, les pluies et les vagues associés aux cyclones ont un impact destructeur majeur sur les infrastructures et les écosystèmes.

> Les principaux mécanismes de formation des cyclones sont assez bien compris. Des progrès technologiques récents offrent la perspective d'une compréhension plus fine des processus d'intensification et de formation de l'œil.

> Les épisodes cycloniques semblent de plus en plus nombreux et destructeurs, une impression en partie biaisée par l'amélioration de la surveillance satellite et par la densification des aménagements littoraux.

> Néanmoins, le changement climatique semble favoriser la formation d'ouragans puissants et accroître leur dangerosité.

LES AUTEURS

EMMANUEL DORMY
directeur de recherche du CNRS, professeur à l'École normale supérieure et à Sciences Po, à Paris

LUDIVINE ORUBA
maîtresse de conférences à Sorbonne Université, au Laboratoire atmosphères, milieux et observations spatiales, à Paris

En 2018, le cyclone tropical Florence, ici vu depuis la *Station spatiale internationale*, a atteint la catégorie 4 au-dessus de l'Atlantique puis a rapidement diminué en intensité. Il a néanmoins provoqué de nombreux dégâts et plusieurs dizaines de morts aux États-Unis.

© Nasa

Des cyclones plus destructeurs ?

Ces dernières décennies, Katrina, Idai, Harvey et bien d'autres ouragans ont semé le chaos sur leur passage. Ces phénomènes paraissent plus fréquents et plus violents, mais le sont-ils réellement ? La réponse des chercheurs est nuancée.

Ouragans dans l'Atlantique nord, typhons dans le nord-ouest du Pacifique ou encore cyclones tropicaux dans l'océan Indien, tous ces termes désignent le même phénomène météorologique, parmi les plus spectaculaires et les plus destructeurs de la planète. Lorsqu'un cyclone se forme, c'est la dynamique atmosphérique qui s'emballe, s'amplifie et finit par libérer des quantités gigantesques d'énergie. Les vents atteignent jusqu'à 300 kilomètres par heure, soit la vitesse d'un TGV. Des débris de toutes sortes (morceaux de bois, tôles) deviennent alors autant de projectiles menaçants. Mais ces effets dévastateurs ne sont rien en comparaison de ceux que provoquent les fortes précipitations et les crues de plusieurs mètres de hauteur qui accompagnent le phénomène.

Ainsi, en 2005, le cyclone Katrina a complètement inondé La Nouvelle-Orléans et ses environs. Le bilan s'est élevé à 1800 morts et les dégâts ont été chiffrés à 108 milliards de dollars. Plus récemment, en 2019, le cyclone Idai a touché les côtes du Mozambique, où il a déversé des trombes d'eau qui ont coûté la vie à plus de 1000 personnes. Mais ces deux cyclones ne font pas figure d'exceptions. Chaque année, ils sont plusieurs à ravager les régions qu'ils traversent.

La menace que les ouragans font peser sur les populations côtières et l'impact financier qu'ils représentent incite à les surveiller de près et à comprendre comment ce phénomène prend forme, se développe et évolue. L'un des objectifs est d'anticiper leur arrivée pour limiter les dégâts qu'ils provoquent et mettre les habitants à l'abri. Les données toujours plus complètes et précises révèlent cependant une tendance alarmante : l'effet destructeur des cyclones semble être à la hausse au cours de ces dernières décennies. Ce constat est-il réel ou le résultat de biais observationnels ?

DES SATELLITES DE SURVEILLANCE

Pendant longtemps, les seuls témoins de ce phénomène ont été les marins et les populations vivant dans les régions touchées par les cyclones. Les premières descriptions consignées par écrit datent du XVII^e^ siècle. Ainsi, vers 1650, le géographe allemand Bernhardus Varenius s'est intéressé aux tempêtes tropicales et a dépeint les cyclones comme des tourbillons. Mais c'est au XIX^e^ siècle que leur suivi scientifique a vraiment commencé, sous l'impulsion notamment de Henry Piddington, capitaine de la marine marchande britannique. On lui doit le terme de « cyclone », du grec *kyklos*, la roue ou le cercle. Puis, au cours du XX^e^ siècle, les techniques d'observation se sont nettement enrichies, en particulier grâce aux satellites météorologiques à partir des années 1970. Enfin, en 2017, la Nasa a lancé la constellation *CYGNSS* (*Cyclone Global Navigation Satellite System*), dédiée spécifiquement à la surveillance des cyclones. Cette dernière est parfois complétée avec l'utilisation d'avions ou, depuis une dizaine d'années, de drones qui effectuent des vols de reconnaissance à l'intérieur même des cyclones.

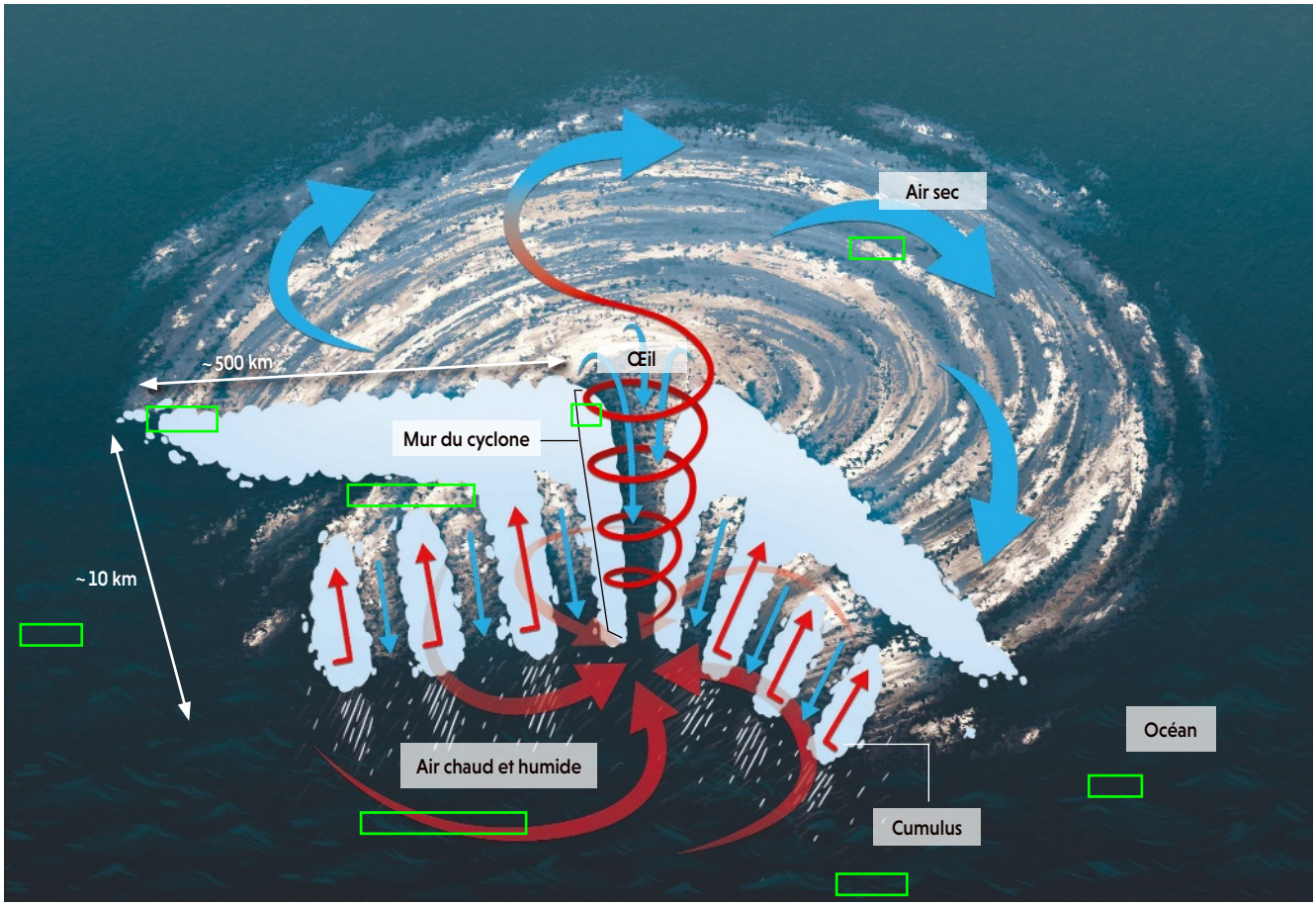
Cette amélioration des techniques de suivi permet l'étude de cyclones qui seraient autrefois passés inaperçus. Les satellites détectent par exemple des ouragans qui se forment en mer, mais diminuent d'intensité ou dispa-

Le bilan de Katrina s'est élevé à 1800 morts et les dégâts ont été chiffrés à 108 milliards de dollars

raissent avant de toucher les côtes. Un autre facteur important a contribué à l'impression qu'il y a davantage de cyclones : la population côtière. Plus de 20 % de la population mondiale vit actuellement à moins de 30 kilomètres des côtes et ce chiffre ne fait qu'augmenter. Il y a donc plus de risques qu'un cyclone frappe une zone habitée et provoque de nombreux dommages.

Mais la meilleure surveillance et la répartition de la population ne suffisent pas à expliquer l'augmentation de la dangerosité des ouragans. Les simulations numériques, qui ont connu de substantielles améliorations ces dernières décennies grâce à l'utilisation d'ordinateurs de plus en plus puissants, prévoient une croissance de l'intensité des cyclones dans le contexte d'un changement climatique lié aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Pour appréhender cette évolution conjointe des cyclones et du climat, il faut d'abord comprendre les mécanismes qui confèrent autant d'énergie à ce phénomène et rendent les cyclones si dangereux. Le point de départ se situe dans les océans tropicaux, qui accumulent l'énergie du rayonnement solaire sous la forme de chaleur. La température de l'eau de surface peut atteindre 30 °C à la fin de l'été. Cette couche d'eau chaude s'étend en profondeur,



Un cyclone est avant tout alimenté par l'air chaud et humide qui s'élève depuis la surface de l'océan. La condensation de l'air apporte des précipitations et un supplément de chaleur. Le système s'emballe et les vents atteignent jusqu'à 300 kilomètres par heure. La force de Coriolis due à la rotation de la Terre imprime un mouvement tournant au cyclone. Au centre, une zone calme se forme, c'est l'œil du cyclone.

sur des épaisseurs allant de quelques mètres à près d'une centaine de mètres. Elle représente un formidable réservoir d'énergie susceptible d'être transmis à l'atmosphère.

Ce transfert se fait en premier lieu par conduction thermique : l'eau de surface chauffe l'air juste au-dessus. Le gaz à la base de l'atmosphère se dilate et devient plus léger que l'air environnant. En vertu de la poussée d'Archimède, il subit une force l'entraînant vers le haut. Un second effet, plus subtil, vient renforcer ce mouvement : l'évaporation. L'air chaud est capable d'absorber une quantité plus importante de vapeur d'eau que l'air froid (le linge sèche plus vite en été !). Or la vapeur d'eau pèse moins lourd que l'air sec. Les deux effets se renforcent, de sorte que l'air chaud et humide s'élève vers des couches plus hautes de l'atmosphère. L'énergie thermique se transforme ainsi en énergie cinétique : des courants ascendants apparaissent. Ce phénomène est à l'origine de la formation des cumulus, ces gros nuages blancs fréquents sous les tropiques.

LE RÔLE CLÉ DE LA VAPEUR D'EAU

Quand les bonnes conditions sont réunies, ce puissant panache ascendant est encore renforcé par un autre ingrédient : la pluie. Lorsque l'air chaud et humide est entraîné rapidement en altitude, il se refroidit. Il ne peut plus alors contenir autant de vapeur d'eau, celle-ci se condense et de la pluie se forme. Les volumes de vapeur d'eau impliqués dans ce processus sont très importants. Or la condensation des gouttelettes libère de la chaleur, car il s'agit d'un changement de phase exothermique (c'est le processus inverse de l'évaporation : lorsqu'on porte un vêtement mouillé en plein été, l'évaporation refroidit celui-ci). Ainsi, avec la formation de la pluie, l'air se réchauffe davantage et monte d'autant plus vite : la machine atmosphérique s'emballe !

Ces courants d'air ascendants ne constituent pas encore des cyclones. Il faut y ajouter un nouvel acteur, la force de Coriolis. Le courant vertical d'air chaud et humide crée une zone de dépression à sa base vers laquelle de grandes masses d'air convergent horizontalement. Ce problème rappelle celui de la baignoire qui se vide. Un flux horizontal se met en place pour remplacer l'eau évacuée par le siphon. On remarque que le courant ne s'écoule pas en ligne droite : le liquide forme un tourbillon autour du trou de la baignoire. Cela tient à la conservation du moment cinétique, une propriété liée au fait que les lois de la physique >

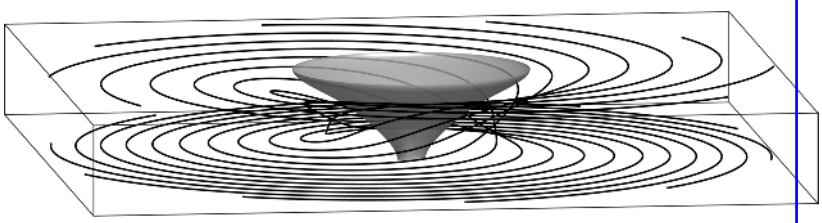
© Marie Mairy

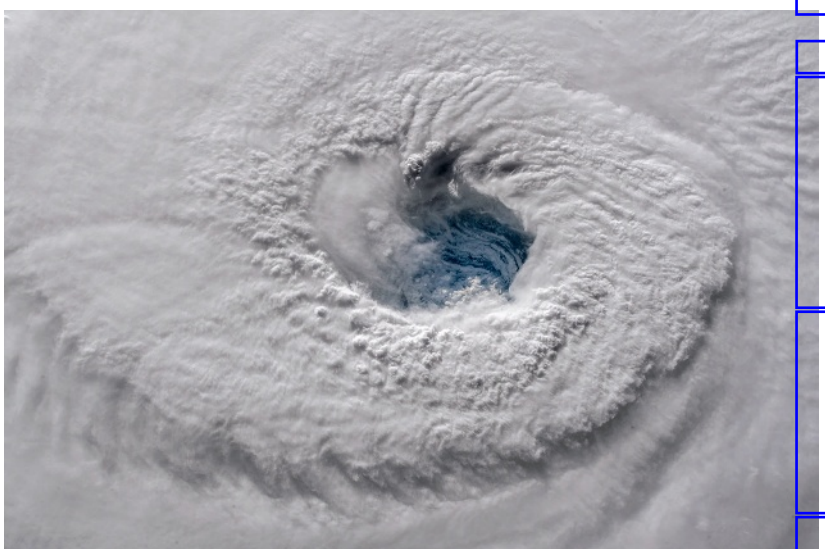
> sont invariantes par rotation dans l'espace. Pour la même raison que les patineurs tournent plus vite sur eux-mêmes lorsqu'ils ramènent les bras le long du corps, un mouvement résiduel de l'eau presque invisible à l'échelle du bain s'amplifie quand le liquide s'approche du siphon. La vitesse de rotation de l'eau autour de l'axe du siphon augmente à mesure que le fluide se rapproche du trou d'évacuation. La conservation du moment cinétique est le seul effet qui compte à l'échelle d'une baignoire. Ainsi, le sens de rotation ne dépend pas de l'hémisphère où l'on se trouve (contrairement à ce que l'on peut parfois entendre).

En revanche, à l'échelle de l'atmosphère, la rotation de la Terre sur elle-même influe sur les mouvements des masses d'air. C'est la « force » de Coriolis (en toute rigueur, il s'agit d'une pseudoforce, car elle est due à la rotation du référentiel dans lequel on étudie le phénomène, la Terre, et non à l'action d'un corps sur un autre). Inefficace à petite échelle, la force de Coriolis devient prépondérante pour dévier les masses d'air de l'atmosphère qui convergent vers une zone de dépression. Ces courants dévient et tournent toujours dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et dans le sens opposé dans l'hémisphère Nord. La forme des cyclones commence à se dessiner.

Point crucial, la force de Coriolis est maximale au pôle Nord et diminue jusqu'à s'annuler à l'équateur, puis elle change de sens quand on passe dans l'hémisphère Sud et atteint de nouveau un maximum au pôle austral. Les latitudes les plus élevées semblent donc favorables à la formation des cyclones, mais il faut aussi prendre en compte la température des océans. En général, on estime qu'une température minimale de 26 °C fournit une réserve énergétique suffisante pour amorcer un cyclone. Ces conditions sont obtenues au plus près de l'équateur, où la force de Coriolis est à l'inverse la plus faible. En pratique, le meilleur compromis conduit à la naissance des cyclones dans deux bandes comprises entre 10 et 30° de latitude, de part et d'autre de l'équateur.

Une fois formé, un ouragan ne reste pas en place. Il dérive d'une part à cause des vents environnants (associés à la circulation atmosphérique de grande échelle), d'autre part à cause de la force de Coriolis. Comme cette dernière varie avec la latitude, elle ne s'applique pas de la même façon en tout point du cyclone. Conséquence : en l'absence de vents environnants, le cyclone tend à se déplacer vers l'ouest et vers les pôles. L'ouragan persiste au plus quelques semaines avant d'atteindre des terres. Lorsque celles-ci sont habitées, les dégâts sont impressionnants (*voir l'encadré page ci-contre*). Même lorsqu'elles ne le sont pas, la flore et la faune sont largement détruites. Les récifs coralliens, par exemple, mettent plusieurs années à se reconstruire après le passage d'un cyclone (*voir l'encadré page 66*).





© L. Oruba et E. Dormy (simulation) ; Nasa (photo)

Au centre d'un cyclone se forme généralement un œil, une zone dépourvue de nuages et de vents *(comme ci-dessus pour l'ouragan Florence en 2018)*. Les auteurs de l'article ont modélisé comment les vents se soulèvent de la surface à l'approche de l'axe du cyclone et s'en écartent en s'élevant *(en haut)*. Ils montrent ainsi comment se forme le mur qui entoure l'œil du cyclone.

LA MORT D'UN CYCLONE

Mais privé d'un océan chaud et de l'évaporation associée, le « moteur » de l'ouragan finit par caler. Certains peuvent malgré tout se manifester encore plusieurs jours après avoir touché terre. Ce fut le cas notamment du cyclone Harvey en 2017, qui déversa des pluies diluviennes sur les côtes du Texas pendant cinq jours consécutifs.

En dérivant vers des latitudes plus élevées, le cyclone peut aussi rencontrer des eaux plus froides. Il perd alors en puissance et se transforme en tempête, à l'image du cyclone Ophelia, qui, en 2017, n'était plus qu'une tempête, dite « tempête des moyennes latitudes », en arrivant sur les côtes de l'Irlande.

Un troisième mécanisme peut mettre fin à un ouragan : les vents d'altitude. Si ces vents sont plus forts que les vents de surface, ils « cisaillent » les cyclones, voire bloquent leur formation. Ces vents tendent à incliner les ouragans et le mécanisme d'intensification perd en efficacité. Ils agissent comme un véritable frein. >

UN MONSTRE MÉTÉO-ROLOGIQUE

L'eau et le vent d'un cyclone occasionnent de très nombreux dégâts, à l'image de ceux observés à la Nouvelle-Orléans, aux États-Unis, après le passage de Katrina en 2005 *(en haut)*, et dans la région de Beira, au Mozambique, touchée par le cyclone Idai, en 2019 *(en bas)*.

Les cyclones comptent parmi les événements extrêmes les plus dévastateurs. Même si ce n'est peut-être pas la meilleure façon d'évaluer leurs impacts, on peut noter qu'ils ont entraîné en 2017 dans le bassin Atlantique plusieurs centaines de milliards d'euros de dégâts. Ils ont également causé la disparition de plusieurs milliers de personnes.

Les cyclones accumulent une puissance extraordinaire, car ils sont de formidables machines à transformer l'énergie thermique emmagasinée à la surface des océans en vents violents et en pluie. Pour un cyclone moyen, d'un rayon de 200 kilomètres, entraînant 10 centimètres de pluie par jour, la puissance libérée par la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau qui s'élève de la mer peut être estimée à environ 10^{14} watts. Ce chiffre impressionnant doit cependant être considéré avec prudence, car seule une petite fraction de cette énergie thermique sera effectivement convertie en vents. Pour ce même cyclone, en considérant des vents soufflant à 180 kilomètres par heure à 30 kilomètres du centre du cyclone, seuls 10^{12} watts sont nécessaires pour soutenir ces vents. À titre de comparaison, la puissance de production électrique totale de la France s'élève à environ 6×10^{10} watts. Il faut considérer la production mondiale (3×10^{12} watts) pour atteindre l'ordre de grandeur du cyclone considéré ici.

Les vents d'un cyclone peuvent atteindre 300 kilomètres par heure. Ils mettent à l'épreuve les infrastructures et transforment en projectiles les morceaux de bois, plaques de tôles et autres débris. On utilise d'ailleurs l'intensité des vents pour classer les cyclones selon l'échelle de Saffir-Simpson *(voir le tableau)*. Dans l'Atlantique nord, 14 ouragans de catégorie 5 ont déjà été observés au XXIe siècle, dont 8 ont dépassé les 280 kilomètres par heure. Les vents sont mesurés à 10 mètres au-dessus du sol et doivent être soutenus sur une minute (on parle de « vents soutenus »). Cette grandeur ne mesure pas nécessairement l'importance des dégâts causés. En 2017, par exemple, le cyclone Harvey a entraîné des inondations sans précédent qui ont provoqué des dégâts importants au Texas, bien qu'il n'ait atteint « que » la catégorie 4 en touchant les terres et qu'il ait rapidement été rétrogradé au stade de tempête tropicale.

Plusieurs effets se combinent pour créer ces inondations dévastatrices. Tout d'abord, le cyclone étant une dépression (l'air léger ascendant crée une baisse de la pression atmosphérique en surface), le niveau de l'océan monte. De façon imagée, l'eau est aspirée par la baisse de pression. Ensuite, les vents violents du cyclone déplacent des masses d'eau importantes, parfois vers les terres. Ils entraînent aussi des vagues d'amplitudes exceptionnelles. Enfin, les pluies associées à la condensation de l'humidité des océans sont torrentielles. Pour s'en donner une idée, plus de 1 mètre d'eau peut tomber en seulement 12 heures sous un cyclone tropical intense. À titre de comparaison, la pluie apporte en moyenne un peu moins de 1,5 mètre d'eau à Biarritz sur une année entière, le record en France métropolitaine.

Catégorie	Vitesse des vents soutenus (km/h)
Dépression tropicale	< 63
Tempête tropicale	63-118
Cyclone de catégorie 1	119-153
Cyclone de catégorie 2	154-177
Cyclone de catégorie 3	178-208
Cyclone de catégorie 4	209-251
Cyclone de catégorie 5	> 252

L'échelle la plus utilisée pour définir l'intensité d'un cyclone est celle de Saffir-Simpson (du nom de Herbert Saffir, ingénieur civil, et Robert Simpson, alors directeur du NHC, le centre américain des cyclones, à Miami). Les cyclones sont classés en 5 catégories en fonction de la violence de leurs vents.

En haut : © Shutterstock.com/StratosBril ; en bas : © Shutterstock.com/fivepointsix

> Certaines régions du globe soumises à ces vents d'altitude, telles Hawaii ou la Polynésie française, subissent en pratique moins de cyclones qu'elles ne le devraient si l'on se fie uniquement à la température de surface des océans.

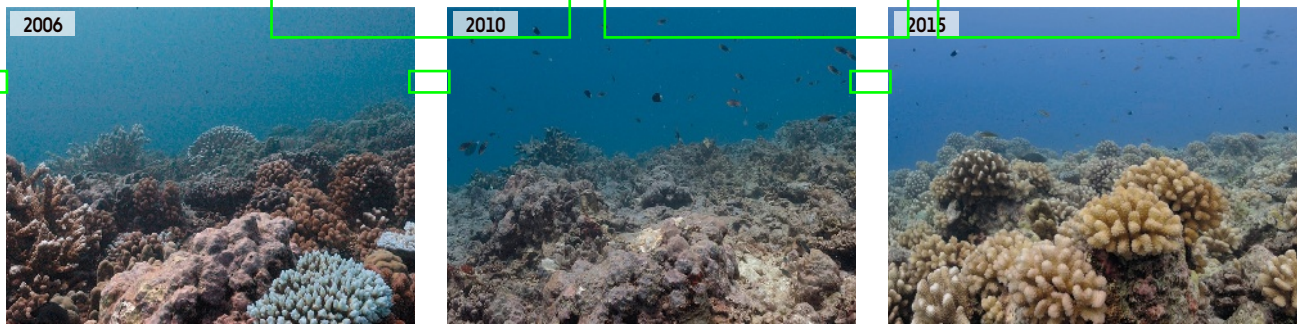
On explique donc relativement bien la dynamique des cyclones de leur naissance à leur mort. Cependant, certains aspects restent encore mal compris et font l'objet de discussions parmi les spécialistes. Par exemple, il ne suffit pas que l'air soit chaud et humide à la surface de l'océan pour qu'un cyclone se forme. Le mécanisme qui conduit à une élévation de cet air correspond à une instabilité dite «linéaire» (ou «supercritique»), car elle croît à partir d'une perturbation, aussi petite soit-elle (c'est par exemple le cas de l'effet Larsen, un micro orienté vers un haut-parleur amplifie un son initialement inaudible qui devient un sifflement strident). En général, cette instabilité linéaire entraîne simplement la formation de cumulus, qui se transforment à terme en orages. Pour déclencher la formation d'un cyclone, il faut que certaines conditions supplémentaires soient remplies. On parle alors d'une instabilité non linéaire (ou sous-critique), car une perturbation assez grande est nécessaire pour amorcer le phénomène, de la même façon qu'on utilise un démarreur électrique pour lancer le moteur thermique d'une voiture.

Dans le cas des cyclones, il faut une organisation particulière des vents pour entraîner le système. Ces conditions sont encore assez mal connues, même si l'on sait, par exemple, que des perturbations de la circulation atmosphérique, nommées «ondes africaines d'est», contribuent à la naissance des ouragans dans l'océan Atlantique. Ces ondes sont engendrées en Afrique du nord puis se propagent vers l'ouest en direction des Caraïbes.

Dès les années 1960, les chercheurs ont essayé de comprendre les dessous du processus d'intensification qui permet de basculer du stade de tempête à celui du cyclone tropical. L'un des premiers mécanismes proposés, CISK, repose sur l'existence d'une convergence de vents à grande échelle vers le centre dépressionnaire. Dans les années 1980-1990, Kerry

LA RÉSILIENCE DES CORAUX

Les cyclones ne frappent pas uniquement les habitants et les infrastructures. Ils ont aussi un fort impact sur la nature. Par exemple, Yannick Chancerelle, du Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement, a étudié l'impact sur les coraux du cyclone Oli, de catégorie 4, qui a frappé l'île de Moorea, en Polynésie française, en 2010. Le récif, déjà affaibli par les effets du réchauffement climatique et l'augmentation de la température des océans, a été largement détruit. Dans un paysage lunaire, plus une seule colonie corallienne n'était visible. En passant, le cyclone a détaché de gros blocs de corail qui ont « raboté » le fond. Une technique utilise d'ailleurs ce genre de débris de coraux pour dater de façon indirecte (par datation isotopique, radiocarbone, etc.) des épisodes cycloniques du passé (on parle de paléocyclones) qui ne peuvent être documentés autrement. Dans le cadre d'un suivi systématique du récif, Yannick Chancerelle a photographié un site précis du récif par 10 mètres de profondeur, sur le tombant externe de l'île. Grâce à des conditions favorables à la croissance des coraux, ces derniers se sont reconstruits rapidement, en quelques années, après le passage d'Oli. On parle alors de résilience : on assiste à un véritable feu d'artifice de corail. Après ces prises de vues, ce récif a malheureusement connu un épisode de blanchiment majeur en 2019, probablement lié au réchauffement. Soumis à la pression anthropique directe (pollution des côtes), au réchauffement climatique et à la colère des cyclones, ces systèmes sont particulièrement exposés. Si leur résilience leur permet de se reconstruire après des événements extrêmes de courte durée, leur capacité à survivre à des modifications durables du climat est malheureusement des plus incertaines.



Le même récif corallien a été photographié en 2006, avant le passage du cyclone Oli, en 2010, quelques jours après le passage d'Oli, et en 2015. Après avoir été détruits, les coraux se sont reconstitués en quelques années.

© Y. Chancerelle/CRIOBE/SNO CORAIL

Emanuel, du MIT, a proposé un autre modèle en introduisant la théorie WISHE, qui repose sur un élément clé : l'action de vents forts permettant une évaporation plus importante à la surface de l'océan. Plus les vents soufflent fort, plus l'évaporation est efficace – un mécanisme qui renforce les échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère.

Enfin, grâce à des simulations numériques tridimensionnelles, Michael Montgomery, de la Naval postgraduate school, en Californie, et Roger Smith, de l'université de Munich, ont mis en évidence l'importance de structures atmosphériques tridimensionnelles que l'on appelle des « tours de convection ». Elles joueraient un rôle essentiel dans l'intensification du cyclone global en renforçant les vents de sa structure. Le mécanisme d'intensification est encore très débattu au sein de la communauté scientifique. Il faut surtout retenir que ce sont les vents préexistants qui déterminent l'évolution, ou non, vers un cyclone tropical.

LE CALME AU MILIEU DE LA TEMPÊTE

La formation de l'œil du cyclone est un autre aspect qui fait toujours l'objet de recherches. La région centrale du cyclone, de forme conique, constitue sa caractéristique la plus étonnante : souvent visible depuis l'espace, contenant peu ou pas de nuages, cette zone jouit d'un calme absolu au milieu de la tempête (*voir les images page 64*). Cela est d'autant plus surprenant que lorsqu'on se rapproche de cette région, les vents se font de plus en plus intenses. On atteint alors le « mur », où les vents dépassent parfois 300 kilomètres par heure et où les pluies sont les plus intenses. Mais dès que le mur est franchi, on entre dans l'œil du cyclone, dont le rayon est d'environ 50 kilomètres. Le ciel devient bleu, la pluie et les vents cessent. En 2010, lors du passage du cyclone Oli, de catégorie 4, les habitants de la petite île française de Tubuai, dans l'océan Pacifique sud, ont vécu ce moment de répit dans l'œil du cyclone. Mais le calme n'est que de courte durée. En quelques heures, on se retrouve de l'autre côté de l'œil où l'on franchit à nouveau le mur. Les vents sont immédiatement très violents et soufflent dans le sens opposé !

Les mécanismes responsables de la formation de l'œil et du mur qui l'enveloppe restent mal compris et très controversés. L'une des explications le plus souvent avancées repose sur la libération de chaleur latente. L'air humide monte dans le mur avant d'arriver au centre du cyclone ; il libère sa chaleur et renforce ainsi le mur. Devenu froid et sec, l'air redescend alors le long de l'axe ; on parle de subsidence. Par conséquent, sans humidité présente, l'œil est souvent dépourvu de nuages. Mais ce mécanisme avancé dans les années 1980 est avant tout une description phénoménologique de ce qui se passe et suppose déjà l'existence du mur. Il n'explique donc pas la formation de l'œil. Par ailleurs, plusieurs simulations numériques ont montré que l'œil se forme même en l'absence de condensation et de libération de chaleur latente.

En 2018, nous avons proposé un mécanisme reposant sur l'extraction de tourbillons de la couche limite atmosphérique. L'air qui converge vers la zone de dépression est doté de deux mouvements propres : il tourne autour du centre de la dépression à cause de la force de Coriolis (on parle de « vorticité axiale ») et il spirale sur lui-même dans un plan perpendiculaire à ce premier mouvement (on parle de « vorticité azimutale »). Lorsque cet air quitte la surface de l'océan pour s'élever en altitude, il conserve ces deux vorticités. La vorticité azimutale conduit le vent à s'écarter de l'axe alors qu'il monte. On obtient ainsi la forme conique de l'œil. Et, simultanément, cette vorticité entraîne l'air sec d'altitude vers le sol au centre du cyclone, comme observé. Le modèle s'appuie sur un système simplifié afin de bien comprendre les phénomènes en jeu. Des simulations numériques plus réalistes sont en cours pour confirmer ce scénario.

Malgré ces inconnues, les spécialistes tentent déjà de comprendre comment les cyclones évoluent dans un contexte de changement climatique. Ce dernier se traduit en particulier par une hausse des températures océaniques et une élévation du niveau des océans (due à la fonte des calottes antarctique et groenlandaise, mais aussi à la dilatation thermique de l'eau des océans). Par exemple, Ben Santer, du laboratoire américain Lawrence-Livermore, et ses collègues ont montré en 2006 que dans les régions tropicales de l'Atlantique et du Pacifique, la température de surface de l'océan avait augmenté d'entre 0,3 et 0,6 °C au cours du XX^{e} siècle. L'accumulation de chaleur dans le système implique que les océans transfèrent davantage d'énergie à l'atmosphère. Or une hausse de 1 °C de la température de l'atmosphère permet une augmentation de 8 % d'humidité dans l'air. C'est autant d'énergie supplémentaire disponible pour les cyclones. >

Le XXI^{e} siècle a déjà connu 14 ouragans de catégorie 5

NOMS DE CYCLONES

Les marins donnaient autrefois des prénoms surtout féminins aux cyclones. Depuis les années 1970 et le mouvement féministe aux États-Unis, un ouragan sur deux porte un prénom masculin. Le centre américain des cyclones, à Miami, établit six listes de noms suivant les lettres de l'alphabet pour six années consécutives et réutilisées par la suite. Lorsqu'un ouragan est particulièrement dévastateur, son nom est remplacé dans la liste (« Harvey » a été remplacé, après 2017, par « Harold »). Seules deux lettres manquent à la liste : Q et U, par manque d'imagination. Il n'y a donc pas à craindre de cyclones Quentin ou Ursula ! En 2020, pour la deuxième fois après 2005, la liste a été épuisée. On utilise alors l'alphabet grec pour nommer les cyclones.

> Un océan plus chaud semble donc mener naturellement à des cyclones plus fréquents et plus intenses. Justement, ces dernières années ont été marquées par de nombreux cyclones exceptionnels. Le XXIe siècle a déjà connu 14 ouragans de catégorie 5, près de la moitié du nombre observé sur la totalité du siècle précédent. Par exemple, les saisons cycloniques 2005 et 2020 ont battu des records en termes de nombre d'ouragans (la liste est allée jusqu'à « Epsilon » en 2005 et inclut notamment Katrina et Rita ; la saison 2020, alors qu'elle n'est pas terminée, en était déjà à l'ouragan « Êta » au 1er novembre). Ces dernières années ont aussi été marquées par des ouragans exceptionnels : par exemple Haiyan en 2013, Patricia en 2015, Irma et Maria en 2017 ou Dorian en 2019 se sont distingués par l'intensité de leurs vents, et Harvey en 2017 a marqué les esprits avec ses pluies torrentielles. Ces cas récents renforcent l'impression que les cyclones destructeurs sont de plus en plus puissants et davantage fréquents. Pourtant, le lien entre l'intensification ou la fréquence des cyclones et le réchauffement climatique n'est pas aussi simple. L'augmentation de la température moyenne des océans ne modifie pas systématiquement à la hausse la fréquence et l'intensité des ouragans : l'année 2006 a, au contraire, été l'occasion d'une accalmie bienvenue.

UN MONDE SANS CYCLONES ?

L'équipe du projet *Stormfury* en 1966. L'avion était utilisé pour disperser de l'iodure d'argent afin de perturber la dynamique des cyclones. Le projet n'a pas été concluant.

Devant les destructions impressionnantes causées par les cyclones à travers le monde, certains scientifiques ont imaginé des stratégies pour les inhiber. L'énergie cinétique d'un cyclone moyen représente 10 000 fois celle libérée par la bombe atomique d'Hiroshima et dépasse même l'énergie de la bombe nucléaire la plus puissante jamais testée sur Terre. Une telle arme aurait donc peu de chances de détruire un cyclone, mais c'est pourtant l'idée saugrenue émise en 1945 par le maire de Miami de l'époque, Herbert Frink, au président Truman. Heureusement, cette piste ne fut pas poursuivie ! D'autres idées plus ou moins réalistes ont par la suite été envisagées. En 1966, les météorologues américains Joanne et Robert Simpson (de l'échelle Saffir-Simpson) ont proposé de recouvrir l'océan près d'un cyclone naissant d'une couche d'un fluide immiscible et plus léger, comme des hydrocarbures ou des huiles, afin d'empêcher l'évaporation. En 2005, Grigory Barenblatt et Alexandre Chorin, deux mathématiciens de l'université de Californie à Berkeley, et un collègue ont repris cette idée en suggérant d'utiliser un tensioactif – la tension de surface étant nécessaire à la formation de gouttelettes à la surface de l'océan. Selon leur idée, empêcher la formation de ces gouttelettes faciliterait le développement de turbulences dans le vent qui inhiberaient à leur tour la formation du cyclone.

En 1976, des chercheurs de l'université d'État du Colorado ont proposé d'utiliser de la suie en grande quantité afin de perturber l'équilibre thermique du cyclone. La suie aurait été produite en brûlant des hydrocarbures en périphérie du cyclone…

Un autre projet a quant à lui été mené de façon très sérieuse par les États-Unis pendant dix ans, de 1961 à 1971 : le projet *Stormfury*. Il consistait à envoyer un avion traverser un cyclone actif pour l'ensemencer d'iodure d'argent. Ce projet reposait sur l'idée que l'iodure d'argent servirait de graine pour amorcer la solidification de l'eau en surfusion et permettrait ainsi de modifier la structure du cyclone en libérant une partie de la chaleur latente de liquéfaction à l'extérieur du mur de l'œil. Il a été abandonné dans les années 1970 par manque de résultats.

Il y a une dizaine d'années, le projet *Salter Sink* visait à installer des pompes près des côtes menacées : ces pompes devaient exploiter l'énergie fournie par la houle pour injecter l'eau chaude de surface vers les profondeurs. Par mélange, cela aurait refroidi la surface de l'océan. Enfin, un projet récemment porté par la société norvégienne OceanTherm propose d'immerger des tuyaux percés au fond de l'océan. En faisant circuler de l'air dans ceux-ci, on créerait un rideau de bulles qui entraînerait vers la surface les eaux froides des profondeurs. Comme dans le projet *Salter Sink*, l'objectif est ici de refroidir les eaux de surface afin de réduire l'énergie disponible pour les cyclones. Dans ces scénarios, le surplus d'énergie thermique emmagasiné en surface se trouverait absorbé par l'océan plutôt que par l'atmosphère… Les conséquences d'une telle modification des flux d'énergie restent à évaluer.

© NOAA

Depuis trente ans, les études théoriques et les simulations numériques prévoient que l'intensité des cyclones devrait augmenter, mais pas nécessairement leur fréquence. La question est restée longtemps débattue, car les données observationnelles et la précision des modèles étaient insuffisantes pour conclure. Il fallait d'une part disposer de résultats statistiquement robustes et d'autre part pouvoir corriger certains biais dans les données : la détection plus efficace de cyclones grâce à l'amélioration des techniques, une population plus importante exposée aux risques cycloniques, ou encore l'influence des oscillations naturelles du climat – des cycles quasi périodiques de variations locales de température de surface de la mer, de la température de l'atmosphère ou des précipitations, par exemple.

L'INFLUENCE D'EL NIÑO

Mais ces dernières années, les simulations numériques ont joué un grand rôle pour démêler ces phénomènes. Notamment, elles ont souligné l'importance des oscillations naturelles du climat. L'impact de ces oscillations, souvent localisées dans une région donnée, peut s'étendre à la planète entière en influant sur la circulation atmosphérique globale. La plus connue du grand public est probablement l'ENSO (El Niño Southern Oscillation) dans le Pacifique équatorial. Elle se traduit notamment par une oscillation de la température de surface de l'océan au large du Pérou : dans la phase El Niño, la température y est maximale, et c'est le contraire pendant la phase La Niña.

El Niño renforce les vents d'altitude qui soufflent au-dessus de l'Atlantique. Le phénomène de cisaillement associé à ces vents inhibe alors la formation d'ouragans. L'automne 2020, par exemple, est caractérisé par une phase La Niña : un faible cisaillement de vent a permis une saison cyclonique très intense dans l'Atlantique nord. Depuis quelques années, plusieurs organismes émettent des prévisions sur l'intensité d'une saison cyclonique en prenant en compte, entre autres, les oscillations naturelles du climat. Ils avaient ainsi anticipé la saison 2020, particulièrement active dans l'Atlantique nord.

La prise en compte de ces facteurs a permis d'affiner les modèles questionnant le lien entre changement climatique et cyclones. Dans trois études parues en 2020, Kerry Emanuel, l'équipe de Thomas Knutson, de l'université de Princeton, et celle de James Kossin, de la NOAA (l'agence nord-américaine de météorologie) ont confirmé que la hausse de la température moyenne n'augmente pas nécessairement la fréquence des cyclones tropicaux. En revanche, la fraction de cyclones les plus forts est plus élevée. À ce phénomène d'intensification s'ajoutent

Les prévisionnistes avaient anticipé une saison 2020 très active dans l'Atlantique nord

diverses évolutions confirmées ou encore débattues qui pourraient contribuer à rendre les cyclones plus destructeurs : la hausse du niveau des océans accroît les risques d'inondation, la saison cyclonique pourrait s'allonger, les cyclones pourraient ralentir…

Ce dernier point a été soulevé par James Kossin en 2018. En compilant des données acquises depuis la fin des années 1940, ce chercheur a suggéré que la vitesse moyenne de déplacement des cyclones avait diminué d'environ 10 %. Ce ralentissement, s'il se confirme, implique qu'un cyclone déverse davantage d'eau et souffle plus longtemps à l'endroit où il rencontre la terre ferme. Les risques de crues augmentent et les vents forts infligent d'autant plus de dégâts. L'origine d'un tel ralentissement est encore mal comprise. Les liens entre les propriétés des cyclones et le climat sont loin d'être tous identifiés.

Devant un tel danger, il est évidemment tentant de chercher des solutions pour essayer d'empêcher la formation des cyclones, voire pour les détruire. Plusieurs approches ont déjà été envisagées (*voir l'encadré ci-contre*), pour l'instant sans grand succès. Outre les conséquences écologiques, parfois terribles, de certains de ces projets (il serait probablement difficile aujourd'hui d'envisager de répandre volontairement et massivement des hydrocarbures sur l'océan voire de l'iodure d'argent ou de la suie dans l'atmosphère), il convient de se demander : peut-on vraiment envisager une Terre sans cyclones ?

Aussi loin que l'on remonte par des observations indirectes, les cyclones ont toujours frappé la Terre (certaines données semblent même indiquer qu'ils existaient déjà au Crétacé). Ils sont une partie intégrante du climat de notre planète, qu'ils contribuent à réguler : ils déplacent de grandes quantités d'énergie des océans surchauffés vers les latitudes plus élevées. Il est difficile d'estimer quelles seraient les conséquences sur le climat si un jour l'humanité arrivait à les contrôler. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Kossin *et al.*, Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades, *PNAS*, vol. 117(22), pp. 11975-11980, 2020.

K. Emanuel, Evidence that hurricanes are getting stronger, *PNAS*, vol. 117(24), pp. 13194-13195, 2020.

T. Knutson *et al.*, Tropical cyclones and climate change assessment Part 1 et 2, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 100(10), pp. 1987-2007, 2019 et vol. 101 (3), E303-322, 2020.

L. Oruba, *et al.*, Formation of eyes in large scale cyclonic vortices, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 3, pp. 13502-13520, 2018.

L. Oruba *et al.*, Eye formation in rotating convection, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 812, pp. 890-904, 2017.

L. Oruba *et al.*, Rapid oceanic response to tropical cyclone Oli (2010) over the South Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 47(2), pp. 471-483, 2017.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 517 (NOV. 20)
réf. PL517

N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516

N° 515 (sept. 20)
réf. PL515

N° 514 (août 20)
réf. PL514

N° 513 (juill. 20)
réf. PL513

N° 512 (juin 20)
réf. PL512

N° 511 (mai 20)
réf. PL511

N° 510 (avril 20)
réf. PL510

N° 509 (mars 20)
réf. PL509

N° 508 (fév. 20)
réf. PL508

N° 507 (jan 20)
réf. PL507

N° 506 (déc. 19)
réf. PL506

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

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

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

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

TOTAL À RÉGLER ..... €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Signature obligatoire :

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

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

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

La plateforme expérimentale Persée permet d'analyser les effluents d'iode gazeux dans les conditions représentatives d'un accident nucléaire.

L'iode radioactif volatil, un gaz à piéger

CONTEXTE

> Dans une centrale nucléaire, les réactions de fission des atomes d'uranium et de plutonium produisent aussi de l'iode radioactif, dangereux pour la santé s'il est inhalé ou ingéré. Or, si les systèmes actuels de filtration sont très performants pour piéger les aérosols d'iode, ils n'ont pas été conçus pour piéger les formes gazeuses qui pourraient s'échapper de l'enceinte de confinement à la suite d'un accident. Depuis 2013, l'IRSN pilote un projet qui vise à trouver un matériau efficace pour filtrer ces iodes volatils et limiter de tels rejets.

Cahier partenaire
réalisé avec
IRSN
www.irsn.fr

Les tests expérimentaux et la modélisation montrent qu'une zéolithe dopée à l'argent, un matériau poreux, présente de très bons atouts pour empêcher l'iode gazeux de s'échapper d'une centrale nucléaire en cas d'accident grave.

En cas d'accident sur un réacteur, l'un des risques majeurs pour la population environnante est qu'elle soit exposée à un rejet d'iode radioactif. En effet, inhalé ou ingéré, cet élément se fixe sur la thyroïde, glande essentielle à la régulation hormonale, et peut provoquer des cancers. Pour faire face à cette situation, selon le scénario de l'accident et sur ordre des autorités, il est préconisé à chaque personne susceptible d'être exposée d'ingérer un comprimé d'iode stable qui, en saturant la thyroïde, empêche l'iode radioactif de s'y fixer. Cette mesure s'accompagne d'une stratégie de mise à l'abri ou d'évacuation de la population, selon le degré de gravité de la situation.

« En cas de scénario grave, ces stratégies soulèvent diverses questions : quel est le moment le plus opportun pour prendre l'iode stable, combien de prises possibles, dans quel périmètre, etc. ? Une autre solution consiste à réduire au maximum ces rejets d'iode radioactif. Nous cherchons donc à améliorer la sûreté des installations nucléaires dans ce sens », déclare Laurent Cantrel, chef du Laboratoire d'Expérimentation Environnement et Chimie à l'IRSN.

C'est d'abord tout le comportement de ce radioélément à l'intérieur de la centrale endommagée et dans les conditions extrêmes d'un accident grave (avec fusion du cœur) que se sont attachées à comprendre les équipes de l'IRSN depuis quinze ans.

L'iode-131 est produit lors de la fission de l'uranium et du plutonium. Il se trouve donc au départ au niveau des combustibles, au cœur du réacteur. Or, si un accident grave affecte un réacteur, les produits de fission sont en partie relâchés : ils transitent dans le système de refroidissement du circuit primaire, une partie s'y dépose, une autre gagne l'enceinte de confinement, ultime barrière avant un rejet potentiel. Les interactions chimiques au sein du réacteur pendant un accident sont complexes. Elles conduisent, entre autres, à la >

> production d'iode sous forme d'aérosols en suspension, déposés sur les structures, dissous dans l'eau et sous forme de gaz dans l'atmosphère de l'enceinte.

« Mais dans les années 1980, après le premier accident grave à la centrale de Three Mile Island, aux États-Unis, on ne savait pas tout cela. Les connaissances et les outils n'étaient suffisants ni pour décrire les phénomènes complexes mis en jeu lors de la fusion d'un cœur de réacteur, ni pour prédire les quantités d'iode radioactif volatil produit », rappelle Laurent Cantrel. *« Néanmoins, à l'époque, l'accident a conduit à revoir la sûreté des réacteurs nucléaires et, en France, à les équiper d'un système d'éventage-filtration pour préserver l'intégrité de l'enceinte de confinement »*, poursuit-il.

L'enceinte de confinement est dimensionnée pour résister à une pression d'environ 5 bars. En cas d'accident, si la pression vient à dépasser ce seuil, le système doit être actionné pour dépressuriser l'enceinte. Il évacue alors progressivement vers l'extérieur l'air qu'elle contient à travers un filtre métallique et une couche de sable. Les essais de qualification réalisés dans les années 1990 ont montré que le dispositif était efficace pour les aérosols d'iode radioactif puisqu'on estime qu'ils sont piégés à 99,9 %. En revanche, n'ayant pas été conçu au départ pour filtrer les gaz, il ne les retient pas.

INVENTAIRE INÉDIT DES FORMES D'IODE

Depuis, les connaissances ont considérablement progressé. Entre 2005 et 2018, le programme CHIP (Chimie de l'Iode dans le circuit Primaire), pour lequel l'IRSN a développé un dispositif expérimental unique, s'est focalisé sur la caractérisation des différentes espèces d'iode au sein du circuit primaire. Puis le programme STEM/STEM2 (Source Term Evaluation and Mitigation) réalisé entre 2011 et 2019 – a permis d'étudier les sources potentielles des deux formes principales d'iode gazeux – la forme dite « inorganique », l'iode moléculaire (I_2), et la forme organique, l'iodure de méthyle (CH_3I). Il est important de bien les distinguer car elles n'ont ni les mêmes conséquences sur la thyroïde ni les mêmes comportements chimiques, et ne seront donc pas forcément piégées de la même façon.

« En quinze ans, la majeure partie des interactions possibles de l'iode avec les autres composés potentiellement réactifs dont les sources sont nombreuses (peintures contenant des solvants, polymères des câbles électriques, huiles, etc.) ont été passées au crible, dans le circuit primaire d'abord, puis dans l'enceinte de confinement. Et ce, dans les conditions représentatives de température, d'atmosphère et de rayonnement que peut générer un accident de fusion du cœur d'un réacteur », résume Laurent Cantrel.

L'ensemble de ces travaux, à la fois expérimentaux et de modélisation, permet désormais de déterminer le devenir de quelques centaines de grammes d'iode dans un volume de 50 000 m^3 avec une incertitude acceptable pour différents scénarios d'accidents.

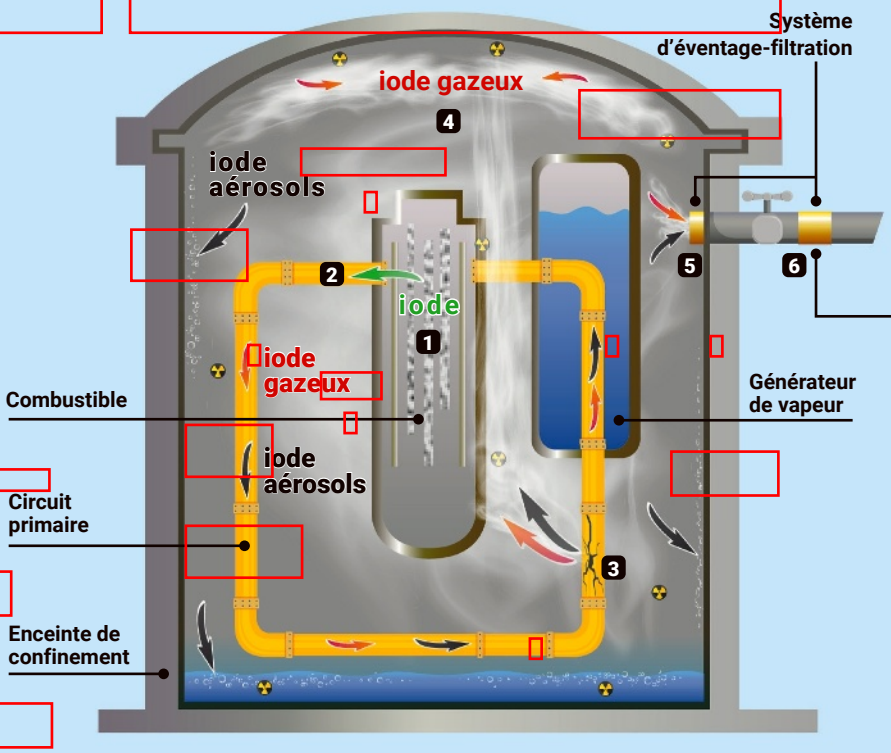
Tout l'enjeu est aujourd'hui de trouver une solution efficace et transposable à l'échelle industrielle pour piéger ces espèces volatiles, de manière pérenne et dans les conditions drastiques d'un accident. C'est l'objet du projet MIRE – Mitigation des Rejets à l'Environnement en cas d'accident nucléaire – lancé en septembre 2013 pour six ans et reconduit jusqu'en 2022. Piloté par l'IRSN et financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), ce programme réunit neuf partenaires de recherche (IRSN, CNRS, université de Lille, université de Lorraine, université d'Aix-Marseille, Armines), une PME (Somez) et deux industriels (EdF, Framatome).

Quel type de solutions vise-t-on, sachant que l'on cherche un système à ajouter au filtre existant qui a fait ses preuves pour les aérosols ? La stratégie la plus fiable consiste à utiliser des matériaux absorbants poreux pour piéger l'iode gazeux au sein même de leur structure cristallographique. Mais quel est le matériau le plus adapté ?

Les charbons actifs, déjà utilisés en conditions nominales, ont vite été écartés. Ces matériaux, trop sensibles à l'humidité et inflammables, ne sont pas adaptés aux conditions d'un accident grave, où l'atmosphère libérée est principalement composée de vapeur d'eau et où la température peut atteindre 150 °C.

L'IODE À LA TRACE

Au cœur d'un réacteur nucléaire, la réaction de fission produit de l'**iode** radioactif au niveau du combustible **1**. Lors d'un d'accident grave, il peut s'échapper vers le système primaire **2** et, *via* une brèche **3**, gagner l'enceinte de confinement **4**. Sur tout ce parcours, il réagit avec d'autres composés et on le trouve alors sous forme d'aérosols (**iode aérosols**) – en suspension, en dépôts, ou dissous dans l'eau (CsI, I_xO_y) – et sous forme de gaz (**iode gazeux**) (I_2) et (CH_3I). Les différents programmes menés par l'IRSN ont permis de montrer que sur environ 20 kg d'iode dans le combustible, 10 kg arrivent dans l'enceinte. Et au fil des réactions chimiques, moins de 1 kg s'y trouve sous forme de gaz. En cas de surpression dans l'enceinte et pour éviter sa destruction, on actionne le système d'éventage-filtration qui libère ces produits. Les aérosols d'iode radioactif sont retenus par le dispositif actuel (un filtre métallique **5** et un filtre composé de sable **6**). Quant aux gaz, un filtre supplémentaire, constitué de zéolithe –matériau microporeux– devrait permettre de les piéger **7**.



Le choix s'est alors porté sur l'étude de deux types de matériaux prometteurs : les zéolithes d'une part, une famille de cristaux microporeux constitués d'aluminosilicates, et les MOF (*Metal Organic Framework*) d'autre part, des composés hybrides, à la fois minéraux et organiques.

Pourquoi ? Les zéolithes, d'abord : *« Ces matériaux sont déjà utilisés pour épurer des gaz au niveau industriel, résistent assez bien aux conditions d'oxydation et d'irradiation et sont peu sensibles à la température »*, explique Laurent Cantrel. De plus des travaux pionniers menés aux États-Unis dans les années 1970 avaient montré que si on les enrichit en argent, ils peuvent piéger l'iode gazeux. Cette capacité d'adsorption tient à leur structure cristallographique : les zéolithes ont un squelette d'atomes de silicium et d'aluminium, que l'on peut enrichir en cations métalliques*. En effet, si l'on substitue un atome de silicium par un atome d'aluminium, on crée une charge négative que l'on peut compenser en ajoutant un cation, qui vient se fixer à ce squelette. De cette façon, en jouant sur le rapport silicium/aluminium, on dope le matériau en cations. Ce sont ces cations qui réagissent sélectivement avec l'iode gazeux. Dans le cas de l'argent, le cation (Ag^+) réagit avec l'iode de (I_2) ou de (CH_3I) pour former de l'iodure d'argent (AgI), qui restera fixé dans les pores de la structure.

TEST DANS LES CONDITIONS D'UN RÉACTEUR ACCIDENTÉ

Comment définir à la fois le type de zéolithe le plus adapté et le cation le plus performant dans les conditions de l'enceinte du réacteur accidenté ? Au début du projet en 2013, c'est donc à un ensemble de questions qu'il fallait répondre : l'argent est-il bien le meilleur cation ? Si oui quelle est la teneur en argent optimale pour un filtre efficace ? Le piégeage est-il pérenne ? Quelle est l'influence des autres gaz présents sur la capacité d'adsorption de ce matériau ?

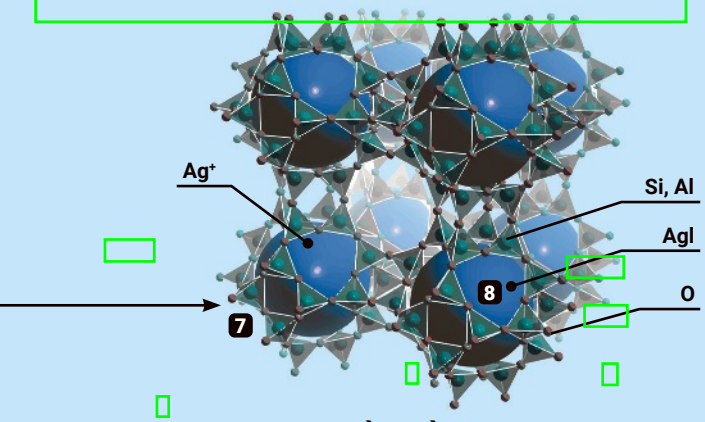
Sous la direction de Laurent Cantrel et de Bruno Azambre de l'université de Lorraine, Mouheb Chebbi, aujourd'hui chercheur à l'IRSN, démarrait alors sa thèse : *« Nous avons commencé par explorer les performances de différents cations, comme le cuivre, l'argent, le plomb, etc. pour une structure de zéolithe donnée, en combinant des calculs de chimie théorique qui modélisent les interactions électroniques entre atomes et des analyses expérimentales. Les deux approches ont révélé parallèlement que l'argent (Ag^+) était bien le plus apte à capturer durablement l'iode des gaz I_2 et CH_3I, dans les conditions de température, d'humidité et d'irradiation d'un accident grave »*, explique-t-il.

Toujours dans le cadre du projet MIRE, les chercheurs ont ensuite testé expérimentalement et de manière systématique, pour une quinzaine de zéolithes différentes dopées à l'argent, les effets de structure, de texture et de la teneur en argent sur la capacité d'adsorption de l'iode ainsi que sur la stabilité des composés piégés. Résultat, la faujasite, une zéolithe à larges pores *(voir infographie)* s'est révélée le matériau le plus prometteur. Enrichie à hauteur de 20 % en argent, elle atteint les meilleures performances de rétention et de stabilité du stockage de l'ordre de plusieurs centaines de milligrammes d'iode capté par gramme d'adsorbant, dont 80 % sous forme de précipité AgI, très stable.

Puis, les équipes de Laurent Cantrel et de Céline Monsanglant-Louvet, de l'IRSN, ont confirmé les performances de ce matériau sur les bancs expérimentaux Safari et Persée de l'IRSN, dont les spécificités complémentaires permettent de couvrir les conditions particulières d'un accident (température, débit gazeux, humidité, nature du gaz, iode stable ou radioactif). Cette zéolithe est donc clairement un très bon candidat.

Quant aux MOF, la deuxième famille de matériaux investiguée, les recherches menées par l'équipe de Thierry Loiseau et Christophe Volkringer, de l'université de Lille, sont en cours. Cette piste reste à creuser.

D'ici à 2022, durant les deux dernières années du projet MIRE, des travaux complémentaires seront réalisés pour s'assurer que les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire sont toujours valides dans des conditions propres à une mise en œuvre possible dans les réacteurs français. ■



LA FAUJASITE, PIÈGE À IODE RADIOACTIF

La zéolithe de type faujasite est un minéral de synthèse. La structure cristallographique d'aluminosilicates – un arrangement régulier de tétraèdres de $[(Si,Al)\ O_4]$ – qui forme sa charpente crée de nombreux espaces vides. Ces cages, symbolisées ici par les sphères bleues, constituent un réseau très poreux, capable de fixer sur un site particulier des cations, comme l'ion Ag^+. Ce sont ces cations d'argent qui réagissent avec l'iode gazeux pour former de l'iodure d'argent, AgI. Ce dernier s'accumule alors à l'intérieur des pores bleus **8** et y reste stocké de manière pérenne.

NOTES

> Les cations métalliques sont des ions à charge positive, formés à partir d'atomes d'éléments métalliques ayant perdu un ou plusieurs électrons.

RÉFÉRENCES

> https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Organisation/Programmes/projet-Mire/Pages/projet-Mire.aspx

> BOSLAND L., COLOMBANI J., Study of the radiolytic decomposition of CsI and CdI2 aerosols deposited on stainless steel, quartz and Epoxy painted surfaces, *Annals of Nuclear Energy*, 141, 107241 (2020).

> CHEBBI M., AZAMBRE B., CANTREL L., KOCH A., A Combined DRIFTS and DR-UV-Vis Spectroscopic in Situ Study on the Trapping of CH3I by Silver-Exchanged Faujasite Zeolite, *Journal of Physical Chemistry C*, 120(33), 18694-18706 (2016).

> CHEBBI M., AZAMBRE B., Evaluation of Silver Zeolites Sorbents Toward Their Ability to Promote Stable CH3I Storage as AgI Precipitates, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(30), 25194-25203 (2017).

> AZAMBRE B, CHEBBI M., LEROY O., CANTREL L., Effects of Zeolitic Parameters and Irradiation on the Retention Properties of Silver Zeolites Exposed to Molecular Iodine, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57, 1468-1479 (2018).

Des mathématiciens dans la Grande Guerre

Dans les années 1930, le groupe de mathématiciens Bourbaki a promu une vision abstraite et universelle de sa discipline en rupture avec celle de ses prédécesseurs. Le sacrifice de nombreux jeunes mathématiciens durant la Première Guerre mondiale a sans doute fortement contribué à ce revirement.

© Shutterstock.com/Everett Collection

Le 11 novembre 1918, à 11 heures, prend effet l'Armistice signé entre les puissances belligérantes. Des Vosges à la mer du Nord, les canons et les mitrailleuses se taisent, les chars d'assaut s'arrêtent, les avions ne décollent plus, les gaz toxiques produits à grande échelle restent dans leurs cylindres, non sans avoir auparavant laissé dans le deuil des millions de familles qui ont sacrifié ce qu'elles avaient de plus cher, leurs jeunes. Dans ce terrible bilan de la Première Guerre mondiale, personne n'a été épargné, pas même « cette élite de chercheurs, de savants, d'écrivains qui, si vite, se sont révélés des chefs sous la mitraille », comme l'évoquait le mathématicien et homme d'État Paul Painlevé en 1916 dans un article intitulé *L'École normale supérieure et la guerre*. Dans cette guerre vite qualifiée de « scientifique », comment a-t-on pu consentir à ce massacre ? Et quelles en ont été les conséquences sur les sciences d'après-guerre ?

Jusqu'à récemment, la plupart des recherches historiques à propos des sciences pendant la Première Guerre mondiale ont porté sur la mobilisation des savoirs au service d'objectifs militaires. Cependant, en 2014, avec d'autres historiens des sciences, nous avons souligné dans l'ouvrage *The War of Guns* >

L'ESSENTIEL

> L'École normale supérieure a payé un tribut particulièrement lourd durant la Première Guerre mondiale. Rien qu'en mathématiques, 22 normaliens agrégés ont été tués.

> Les récits construits à propos de ces jeunes gens ont contribué à forger la mémoire de ce conflit chez les savants.

> Deux visions contradictoires ont émergé : celle d'une science qui s'est mobilisée comme jamais pendant la guerre et celle d'une science qui est restée à l'arrêt pendant plus de quatre ans.

> Juste après la guerre, un nouveau discours les a réconciliées en promouvant une science neutre et désintéressée.

> Dans les années 1930, en adoptant ce discours, le groupe de mathématiciens Bourbaki a contribué à faire des mathématiques la discipline pure et neutre qu'elle est encore aujourd'hui.

L'AUTEUR

DAVID AUBIN
professeur d'histoire des sciences mathématiques à Sorbonne Université, à Paris

Durant la Première Guerre mondiale, les normaliens ont combattu au front comme les autres appelés, participant à la guerre des tranchées et aux grandes batailles comme celles de la Somme ou de Verdun *(ici des soldats français durant cette dernière en avril-juin 1916).*

> *and Mathematics*, à partir de divers cas internationaux, combien les savants – les mathématiciens en l'occurrence – ont joué différents rôles dans cette guerre « totale ».

Les plus jeunes, d'abord, ont souvent servi dans l'armée et, pour plusieurs, sont morts sur le front. Certains, un peu plus âgés, ont pu utiliser leurs compétences mathématiques comme enseignants ou experts techniques. D'autres encore, tel le mathématicien Émile Borel, ont organisé la recherche militaire à des niveaux nationaux ou internationaux. Enfin, les plus âgés, comme Émile Picard, se sont souvent sentis investis d'une mission culturelle et se sont lancés dans une véritable croisade intellectuelle qui, si elle a d'abord eu pour objectif d'affirmer la supériorité des nations alliées, a aussi concerné la manière dont il faut comprendre le rôle des sciences dans les sociétés modernes. Pour Painlevé, par exemple, la guerre a été un « duel à la vie, à la mort [...] entre deux conceptions de la civilisation : il s'agissait de savoir si la science serait pour l'homme un moyen de libération et d'ennoblissement ou l'instrument de son esclavage. »

BOURBAKI, MARQUÉ PAR LA GUERRE

C'est peut-être dans ce contexte qu'il convient de comprendre, en France, l'émergence dans les années de l'entre-deux-guerres d'un groupe de mathématiciens, le collectif Bourbaki. Avec succès, ce groupe a promu une vision des mathématiques en rupture avec celle de leurs aînés. Là où ces derniers prenaient pour acquis la continuité entre sciences naturelles et mathématiques, les bourbakis comme Jean Dieudonné ou André Weil ont insisté sur l'aspect abstrait et universel de leur discipline.

Trop jeunes pour avoir combattu, ils appartenaient à une autre génération encore. Fréquentant l'École normale supérieure (ENS) de la rue d'Ulm, à Paris, au début des années 1920, ils ont parfois attribué à la guerre l'origine de leur conception originale des mathématiques : « Nous autres, les jeunes, se rappellera ainsi Weil, [...] nous aurions normalement dû avoir comme guides toutes ces promotions de jeunes mathématiciens dont certains, nous sommes sûrs, auraient donné beaucoup plus que des promesses, qui avaient été brutalement décimés et dont l'influence était donc détruite. »

Comme tout le monde, les mathématiciens se racontent des histoires qui sont le reflet de leurs expériences. Les récits des membres de Bourbaki attirent notre attention sur le cas de leurs prédécesseurs. Entre 1914 et 1918, 22 normaliens agrégés de mathématiques ont été déclarés morts pour la France, soit environ une promotion et demie de l'agrégation. À l'époque, la Société mathématique de France comportait 178 enseignants. La perte de 22 jeunes gens, sans compter les élèves qui n'ont pas eu le temps de compléter leurs études, est donc significative. Mais ces nombres seuls ne racontent pas d'histoire. Bien que par la suite, on n'ait guère retenu que ces nombres, ce sont les récits construits à propos des jeunes gens tués à la guerre qui ont – plus que les chiffres – contribué à forger la mémoire du conflit chez les savants.

Des recherches récentes tendent à montrer que les récits qu'offrent les bourbakis de leurs années de formation s'appuient en creux sur ceux qu'on a fait du triste destin des

L'École normale supérieure, rue d'Ulm, à Paris, vers 1900.

© Wikimedia commons (CC BY-SA 4.0)

mathématiciens dont Weil déplore l'absence. C'est qu'il a fallu conférer du sens à la vie de ces scientifiques morts au combat avant d'avoir pu laisser des traces importantes dans les sciences. Et si ces récits avaient joué un rôle dans l'émergence d'une nouvelle conception des mathématiques, plus abstraites, plus facilement détachables d'un point de vue moral des usages militaires qu'elles reçoivent?

PROFESSEUR DE MATHÉMATIQUES AU LYCÉE DU MANS

Revenons au jour de l'Armistice. À l'hôpital du Mont-Frenet, à La Cheppe (Marne), grièvement blessé, un jeune homme de 32 ans, autrefois professeur de mathématiques au lycée du Mans, se réjouit de la paix qui arrive: «Toutes ces bonnes nouvelles ragaillardissent», écrit-il à son épouse. Reçu à la fois à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure en 1906, Paul Viple a choisi la seconde alors qu'ils sont peu à le faire. Dans la notice nécrologique qu'il lui consacre en 1920 – et dont ce récit est tiré –, son ancien camarade de classe Maurice Gevrey évoque comment il avait ébloui tant ses camarades que ses professeurs par ses aptitudes intellectuelles: «Nous [...] faisions de longues séances au tableau, à la recherche de quelque problème d'agrégation, long... et parfois ennuyeux. Il avait, dans les calculs compliqués et ingrats, une patience et une sûreté qui nous émerveillaient et il fut bien souvent le seul à poursuivre jusqu'au bout une question que nous abandonnions – leçon très simple de conscience et de volonté qu'il nous donnait à tous.» En 1909, Viple passe l'agrégation de mathématiques. Suivent deux années de service militaire avant qu'il ne commence à enseigner à Paris. Bien qu'il soit agrégé, on lui assigne des classes de niveau inférieur, mais cela semble lui plaire: «J'aime les petits», aurait-il confié à un ami.

Entre-temps, Viple commence à travailler à une thèse de doctorat qui traite des équations fonctionnelles. On sait peu de chose de ce travail qui n'a jamais été publié sous quelque forme que ce soit. Il s'inscrit dans la grande tradition française de l'analyse mathématique, qui a alors atteint son apogée grâce à des figures comme Borel lui-même, mais aussi d'Henri Lebesgue et Maurice Fréchet, lesquels ont précédé Viple de peu à l'ENS.

À l'instar de nombre d'autres normaliens morts à la guerre, Viple laisse une marque plus profonde en tant que professeur. À partir des témoignages qu'il rassemble auprès de nombreux collègues et élèves, Gevrey brosse le tableau vivant du jeune professeur de mathématiques au lycée du Mans, celui d'un homme modeste, patient et, par-dessus tout, d'une grande dévotion envers ses élèves. Ainsi ce

En 1919, peu après la réouverture de l'École normale supérieure, les élèves ont lancé une souscription pour la construction d'un monument aux morts. Celui-ci, érigé en 1923, évoque dans ses bas-reliefs les dures conditions de vie sur le front, comme ici des mitrailleurs en action dans les tranchées.

Entre 1914 et 1918, 22 normaliens agrégés de mathématiques sont morts pour la France

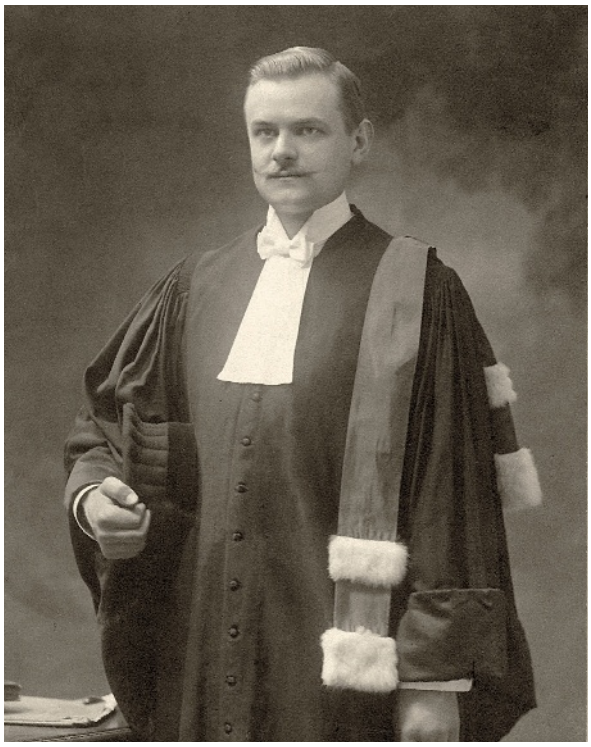
témoignage d'un ancien élève: «C'était toujours avec cette entière simplicité, qui donne confiance à l'élève et ne le rebute pas, qu'il nous initiait aux sciences mathématiques et, toujours avec la même patience, il reprenait les théories, pour lui si claires, que nos esprits rebelles n'avaient point encore assimilées.»

En juillet 1914, Viple épouse une de ses amies d'enfance. Une vie de bonheur semble s'ouvrir à eux, poursuit Gevrey. La nouvelle de la mobilisation générale survient alors que le couple est en voyage de noces en Suisse. Pour beaucoup de normaliens, l'expérience de la guerre est brutale. Dès janvier 1915, l'ENS se rend compte de l'ampleur de la tragédie. Lors de la rencontre annuelle des anciens élèves, on rapporte que sur les 195 élèves actuels mobilisés, seul un peu plus du quart (soit 55 d'entre eux) est indemne après à peine cinq mois de guerre: 35 ont été tués; 15 ont disparu; 74 sont blessés; 21 sont prisonniers; 9 sont malades. >

© Lucas Gierczak

> Ces chiffres sont, tous contextes confondus, parmi les premiers qui circulent dans la presse à propos du coût humain de la campagne désastreuse des derniers mois. Globalement, les recherches récentes confirment que les élèves de l'ENS ont bien été touchés, en proportion, plus que ceux d'autres institutions similaires (sauf l'école militaire de Saint-Cyr) et même que la population masculine française en général. Dans les classes de 1910 à 1912, c'est plus de la moitié qui est tuée ! Mais il convient aussi de noter que les promotions plus anciennes, auxquelles appartient Viple, si elles ont offert leur contingent à la cohorte des morts pour la France, ont en général été mieux préservées.

Il faut relire les terribles romans de Maurice Genevoix, normalien en section lettres, pour comprendre que malgré leurs succès scolaires, ces jeunes gens ont le plus souvent partagé le triste et fatal quotidien de leurs compatriotes. Au début du conflit, en tout cas, le fait d'avoir une formation de scientifique ne permet pas d'échapper aux rigueurs de la guerre des tranchées et l'armée semble n'avoir que faire de leurs compétences particulières. Contrairement à beaucoup, Viple se voit cependant offrir l'occasion de tirer directement avantage de ses études et intègre un régiment du Génie qui offre une protection relative. Il ne rejoint le front qu'en octobre 1915. En juillet 1916, il prend part à l'offensive de la Somme et fait preuve, sous le feu de l'ennemi, d'une conduite héroïque qui lui vaudra d'être décoré de la Légion d'honneur. Après une courte maladie, Viple arrive à Verdun en août 1917 et reste sur le front jusqu'aux dernières offensives qui débutent le 26 septembre 1918. Quelques jours avant d'être fatalement blessé, il écrit à sa femme : « Je me trouve bien de cette vie intéressante et active, mais pas trop dangereuse ; je suis content d'avoir réussi à te rassurer et à calmer tes inquiétudes. »



Paul Viple (1886-1918), normalien de la promotion de 1906, était professeur de mathématiques au lycée du Mans lorsqu'il fut mobilisé.

Avoir une formation scientifique ne permet pas d'échapper à la guerre des tranchées

Fin octobre 1918, son équipe travaille à la consolidation d'une passerelle sur le canal des Ardennes lorsqu'une première salve blesse deux soldats. Un deuxième obus touche un groupe de travailleurs : l'un d'eux meurt sur-le-champ, six sont blessés, dont Viple. Transporté dans un hôpital de campagne, il écrit à sa femme : « Il m'est arrivé un petit accident sans gravité : j'ai reçu quelques éclats d'obus dans le dos qui ont été retirés ce matin. Tout va bien… » Malheureusement, la convalescence ne se passe pas comme prévu. Le lendemain de l'Armistice, on l'opère à nouveau. Le 17 novembre, il écrit d'une main tremblante : « C'est un beau dimanche qui doit commencer l'occupation de l'Alsace-Lorraine. » À minuit, il était mort.

DONNER DU SENS À L'INJUSTIFIABLE

Tel que le rapporte Gevrey dans sa notice, le contraste entre la vie de Viple avant la guerre et celle qu'il mène sur le front est choquant. Mais au milieu de son témoignage, il introduit une solution de continuité en citant un ancien élève de Viple. Bien que cet élève n'ait jamais croisé Viple sur le front, il l'imagine « là-bas, toujours le même, aimable et doux, toujours calme, au repos comme dans la tranchée, la nuit comme le jour, à l'affût comme à l'heure de l'assaut, et bon pour ses hommes comme il l'avait été pour ses élèves. » L'exemple de Viple, comme celui de plusieurs de ses camarades d'infortune, montre l'importance du récit qui permet de donner du sens à l'injustifiable.

© Collection Amicale des anciens élèves du lycée Montesquieu du Mans

Dans les récits que l'on fait du malheureux sort de jeunes scientifiques comme Viple, le rapport entre sciences et guerre n'est donc pas celui qu'on croit. Plus qu'une ressource à mobiliser pour innover dans les techniques de combat, leur science est une valeur culturelle qui sert d'assise à leur généreuse conduite pendant la guerre. C'est que, comme le déclare Painlevé dans l'extrait cité plus haut, la Première Guerre mondiale voit s'affronter deux visions des sciences, lesquelles se reflètent dans la manière dont on raconte dès l'immédiat après-guerre l'effort de mobilisation consenti par les scientifiques eux-mêmes.

DEUX VISIONS CONTRADICTOIRES DES SCIENCES

On trouve d'abord la vision héroïque d'une cohorte de savants qui a su mettre son ingéniosité au service de la nation en danger. À la fin de la guerre, Painlevé, qui de fait a dirigé le gouvernement de la France en 1917, déclare ainsi devant les membres de l'Académie des sciences: dans cette salle, «j'aperçois [...] tels physiciens qui ont contribué à développer les applications militaires de la T.S.F.; tels chimistes qui, dans la guerre des gaz, ont accru nos moyens de protection et d'attaque; tel mathématicien, tel géodésien dont les calculs ont servi à repérer et à détruire les batteries ennemies». Les historiens l'ont amplement montré depuis, la Première Guerre mondiale est bien le théâtre d'une formidable mobilisation des scientifiques, qui, à bien des égards, forme la matrice de l'appui national consenti depuis à la recherche scientifique – le CNRS est par exemple l'héritier direct des structures mises en place à cette époque, notamment la Direction des inventions intéressant la défense nationale, dirigée par Émile Borel.

Mais il existe aussi une vision qui s'exprime avec plus de discrétion, même si elle est, elle aussi, contemporaine du conflit. Une vision qui cherche à mettre la science à distance des horreurs de la guerre. La science n'est-elle qu'un mot «vide de sens», un «faux-semblant hypocrite», s'inquiète dès décembre 1914 le mathématicien Paul Appell? Non, elle doit bien sûr demeurer une des valeurs culturelles chères à la France et qu'il faut à tout prix défendre. Ainsi, ce seraient plutôt les applications de principes connus et non le développement de nouveaux principes fondamentaux qui auraient dominé cette courte période. La manière dont Painlevé lui-même décrit la trajectoire de Borel lors de sa candidature à l'Académie des sciences en 1919 est éloquente: «Les travaux mathématiques de Mr Borel ayant été interrompus par la guerre, je n'ai besoin d'ajouter à mon rapport de 1912 que quelques mots relatifs à la période entre janvier 1913 et juillet 1914.» Comme si la mobilisation scientifique n'avait rien à voir avec sa qualité de savant...

Âgé de 43 ans au début de la Première Guerre mondiale, Émile Borel (1871-1956), mathématicien normalien de la promotion 1889, fut chargé d'organiser la recherche militaire en France.

Alfred Ballongue (1887-1915), mathématicien normalien de la promotion 1909, photographié juste avant de partir au front.

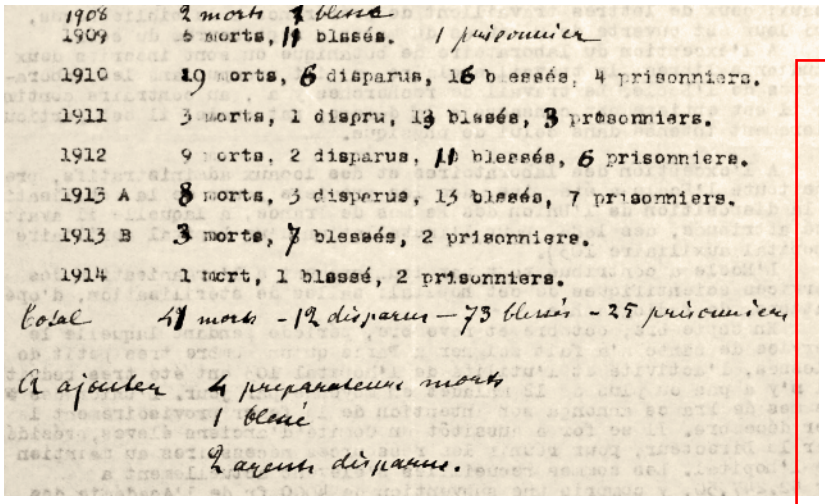
POUR UNE SCIENCE MORALEMENT NEUTRE

Alors, les sciences se sont-elles mobilisées pour la guerre comme jamais auparavant ou ont-elles été à l'arrêt pendant plus de quatre ans? Cette alternative, comme la contradiction évoquée en présentant l'histoire de Viple, entre la vie d'avant-guerre des jeunes normaliens et leur expérience du conflit, se résout en forgeant une nouvelle vision des sciences. C'est encore Painlevé, dans son discours à l'Académie des sciences en 1918, qui donne la clé permettant de faire la synthèse. La science, sous-entend-il, est comme le fer, qui «peut servir à moissonner ou à tuer». La science, en d'autres termes, est neutre moralement: elle n'a pas d'objectifs qui lui soient propres. Seuls ceux qui cherchent à l'appliquer en ont, bénéfiques ou néfastes selon les circonstances. Sans doute faut-il insister, puisque nous en sommes les héritiers, sur l'étrangeté qu'aurait eue cette nouvelle vision des sciences aux yeux des générations précédentes qui, dans la patrie de Condorcet et de Pasteur, voulaient n'en percevoir que l'aspect intrinsèquement positif.

Pour comprendre comment s'impose cette nouvelle vision des sciences, il suffit de constater à quel point elle cadre tout à fait avec celle mise en avant dans les récits faits de la vie des jeunes normaliens morts au combat. La tradition nécrologique de l'ENS est ancienne, mais les notices des morts de la guerre s'en détachent nettement du fait de la jeunesse de leurs sujets. Les circonstances tragiques de leur production nous fournissent un matériel d'une qualité exceptionnelle pour décrire en détail la vie, l'œuvre et la mort de jeunes savants au début du XX^{e} siècle. Les histoires qu'on raconte à leur propos sont émouvantes et il est impossible de les lire sans être profondément affecté par la tragédie individuelle que représente chacune de ces trop courtes existences. Ces histoires cherchent à remplir plusieurs objectifs. C'est évidemment le moyen de faire le deuil de la perte cruelle d'un ami ou d'un élève. C'est aussi l'occasion de rendre hommage à des jeunes gens qui, après un parcours scolaire exceptionnel, se sont dévoués à leur métier de mathématicien. Prises ensemble, ces notices brossent un portrait de groupe qui aura un impact sur la manière dont on cherchera à comprendre la guerre et les sciences.

Ces mathématiciens viennent de toutes les régions de France et sont d'origines sociales diverses, bien que souvent relativement modestes. Leurs *curriculum vitae* qui subsistent parfois dans les archives – comme celui de Joseph Marty, spécialiste des équations de >

© Wellcome Collection (CC BY 4.0) (en haut); © Michèle Ballongue et Jean-Philippe Guerder (en bas)



1908	2 morts 1 blessé
1909	5 morts, 11 blessés. 1 prisonnier
1910	19 morts, 6 disparus, 16 blessés, 4 prisonniers.
1911	3 morts, 1 disparu, 13 blessés, 3 prisonniers.
1912	9 morts, 2 disparus, 10 blessés, 6 prisonniers.
1913 A	8 morts, 3 disparus, 15 blessés, 7 prisonniers.
1913 B	3 morts, 7 blessés, 2 prisonniers.
1914	1 mort, 1 blessé, 2 prisonniers.
Total	47 morts - 12 disparus - 73 blessés - 25 prisonniers.

A ajouter 4 préparateurs morts
1 blessé
2 agents disparus.

Décompte des morts, disparus, blessés et prisonniers parmi les élèves de l'École normale supérieure *(à gauche, leur promotion)* en 1915.

Le but de la génération montante paraît clair: faire de la recherche mathématique pure

> Fredholm, tué le 10 septembre 1914 dans la Meuse – montrent des trajectoires fulgurantes dans de multiples lycées de France, puis dans les classes préparatoires. À l'ENS, ils étudient avec quelques-uns des meilleurs mathématiciens du monde et, après leur agrégation, poursuivent des carrières dans l'enseignement ou la recherche. Des 22 mathématiciens dont on a étudié le destin, 2 seulement ont déjà soutenu une thèse (l'un est enseignant à l'université de Lille ; l'autre astronome à Bordeaux) ; mais 6 autres ont publié des recherches intéressantes et 4 encore ont pu être identifiés comme travaillant à une thèse. Le plus célèbre d'entre eux est sans doute René Gateaux, dont le travail est publié par de jeunes survivants après sa mort le 2 octobre 1914. Mais il convient d'évoquer aussi le travail de Georges Lery sur les fonctions de Green, celui de Jean Clairin sur les transformations de Bäcklund, celui d'Alphonse Blondel sur les marées de la mer Rouge… et plusieurs autres qu'on connaît parfois moins bien.

Si ces parcours sont déjà frappants par leur richesse, ces notices nécrologiques renforcent encore cette impression par le chaleureux portrait, répété page après page, de jeunes gens aussi travailleurs que modestes, respectueux de leurs professeurs, dévoués à leurs élèves comme à leurs enfants. Dans quelques rares occasions, d'autres sentiments émergent. Ils servent souvent à souligner des engagements internationalistes, comme celui de Théophile Rousseau en faveur du mouvement espérantiste, ou – beaucoup plus rarement – de la méfiance vis-à-vis des mathématiques allemandes. Bien sûr, toutes ces qualités se sont transformées en ressources vitales après la déclaration de la guerre. Dans l'ensemble, on dépeint ces jeunes hommes comme étant allés au combat avec résignation: il y a peu d'enthousiasme patriotique dans les récits, mais aucune hésitation non plus à propos de leur devoir. Alfred Ballongue a pris le temps de poser devant le photographe avant de partir au front, mais il a plaidé pour qu'on ne le sépare pas de ses hommes. Comme Viple, le professeur normalien a transféré alors à ses hommes le mélange de bienveillance et de rigueur qu'il réservait à ses élèves.

Certains sont tombés dans des circonstances cruelles, comme Jean Merlin, abandonné blessé sur le champ de bataille et retrouvé mort quelques jours plus tard à plusieurs kilomètres de là. D'autres sont morts héroïquement, comme Jean Piglowski, tué le 18 février 1915 à la tête d'une section de mitrailleurs, après avoir offert une telle résistance que les Allemands auraient érigé sur sa tombe une stèle en son honneur. L'histoire de Piglowski et d'autres frappera la conscience des fabricants de discours. Pendant la guerre, toute une littérature développera la figure du chef que ces jeunes intellectuels incarneront désormais. Peu à peu, c'est pourtant l'image de la promesse brisée qui prendra le dessus. En évoquant en 1919 la mémoire de Paul Lambert, âgé d'à peine 21 ans quand il a été tué, son camarade Gaston Julia – lui-même défiguré par un obus – compare son destin à celui du mathématicien Évariste Galois, mort en 1832 à 20 ans à la suite d'un duel.

DES MATHÉMATIQUES PURES EN RÉACTION À LA GUERRE

Pour les mathématiciens qui organisent la mobilisation scientifique et qui, pour certains, perdent aussi des proches, des élèves, des fils même, l'impression laissée par le massacre est très forte. Les récits tirés des notices nécrologiques connaissent un fort retentissement dans la presse. À la fin de la guerre, le prix payé par l'École semble exorbitant. Si l'éducation que les normaliens ont reçue leur a permis de remplir leur rôle dans la bataille, ils ont aussi convaincu les autorités que leurs aptitudes intellectuelles étaient essentielles

© Archives nationales (France, AJ/61/85)

à la guerre moderne. Dorénavant, les savants serviront en tant que scientifiques, ou du moins dans les armes techniques, où ils seront moins exposés.

À la rentrée solennelle du 24 mars 1919, on commence à cultiver le souvenir de la Grande Guerre sur une double base : d'une part, le rappel du sacrifice de l'École et des promesses brisées que chaque vie perdue représente ; d'autre part, la réaffirmation de la mission de l'École en faveur de « la recherche libre et de la science désintéressée » et de la mission « pacifique et civilisatrice » de la France. Par contraste, l'École polytechnique représentera les ajustements qui doivent être apportés à ces idéaux à la suite de la guerre, notamment un investissement profond dans le développement de nouvelles applications des sciences pour l'industrie ou la guerre.

Dans les années 1920, les jeunes gens qui formeront plus tard Bourbaki sont abreuvés de ces discours. Quelques années plus tard, vers 1935, les membres du groupe entament la rédaction d'un nouveau traité de mathématiques très ambitieux, qu'ils veulent avant tout abstrait et défini par les seuls besoins internes aux mathématiques. Cette vision qu'ils promeuvent de plus en plus activement dans divers écrits à destination de larges publics jusque dans les années 1970 s'oppose de front à la conception promue par leurs aînés qui avaient plutôt tendance, comme on l'a vu, à penser les mathématiques dans la continuité des sciences de la nature.

Malgré cette opposition, ils entonnent volontiers le discours de leur *alma mater*. La mort de tant de mathématiciens pendant la guerre ne semble plus rien d'autre qu'un immense gâchis ; dorénavant, le but de la génération montante paraît clair : ils se doivent avant tout à la recherche mathématique pure. Les récits à propos des mathématiciens morts au combat, même si les membres de Bourbaki choisissent de ne pas s'en souvenir, ont rempli leur rôle : alors même que la recherche militaire est fortement promue par l'État, un large espace pour une science pure, neutre, s'est ouvert pour eux. C'est là, sans aucun doute, l'une des conséquences les plus durables de cette terrible guerre. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Aubin, **L'Élite sous la mitraille**, Rue d'Ulm, 2018.

D. Aubin et C. Goldstein (éd.), **The War of Guns and Mathematics**, American Mathematical Society, 2014.

P. Painlevé, **L'École normale supérieure et la guerre**, *Revue scientifique*, vol. 54, p. 193-195, 1916.

Notices nécrologiques de normaliens morts à la guerre : https://www.presses.ens.fr/client/document/aubin_notices_834.pdf

RENDEZ-VOUS

P.82 *Logique & calcul*
P.88 *Idées de physique*
P.92 *Chroniques de l'évolution*
P.96 *Science & gastronomie*
P.98 *À picorer*

ENVOYER DES MESSAGES À RETARDEMENT

La science cryptographique étudie les moyens de livrer une information en fixant une date avant laquelle elle restera cachée et inaccessible. Un problème de mieux en mieux résolu.

L'AUTEUR

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

Le 29 mai 1875, au milieu de la nuit, Frederick Deland, caissier à la Grand Mahawie Bank, est pris en otage par quatre individus qui se sont introduits chez lui. Conduit sur place à la banque, on lui demande d'ouvrir le coffre dont les malfrats savent qu'il connaît la combinaison. Il leur explique qu'un nouveau dispositif, empêchant d'ouvrir la porte du coffre avant une heure donnée, a été installé. Les menaces ne servent à rien et les voleurs repartent bredouilles.

Ce fut le premier succès des serrures à horlogerie, devenues alors d'usage courant et dont il existe une multitude de modèles différents, que les collectionneurs s'arrachent (*voir l'encadré 1*). Les banques en utilisent toujours, mais aujourd'hui vous en trouverez aussi pour les usages individuels sous le nom, en France, de serrures et coffres «à retardement». Il existe aussi des boîtes de rangement munies de tels dispositifs pour aider les victimes d'addiction à résister à leurs démons. On peut y déposer des téléphones portables, des paquets de cigarettes, de la drogue, de la nourriture, etc., qui, tant qu'ils sont dans la boîte fermée, empêchent qu'on y accède et en abuse.

CAPSULES TEMPORELLES POUR LE MONDE NUMÉRIQUE

Et dans le monde numérique? Existe-t-il des «capsules temporelles» qui permettraient de chiffrer un message sous la forme d'un fichier informatique qu'on laisserait circuler, qu'on pourrait dupliquer et qui resterait illisible jusqu'à une certaine date, à partir de laquelle l'information cachée deviendrait accessible? La cryptographie moderne a abordé la question et les plus anciens travaux remontent à 1993. Le problème est assez délicat et les diverses solutions proposées ne réussissent que partiellement à créer ces capsules temporelles.

Pourtant de tels mécanismes de chiffrement à retardement seraient susceptibles de nombreuses applications. En voici quelques exemples.

– Vous voulez faire un cadeau à un proche pour son anniversaire. Vous lui envoyez un message chiffré qui se libère le jour venu et dans lequel est indiqué l'endroit où est caché son cadeau, ou les données pour accéder au compte où vous lui avez laissé une somme d'argent.

– Vous êtes un lanceur d'alerte… ou un maître chanteur. Vous déposez des informations compromettantes dans un endroit secret, peut-être sur internet, que vous ne voulez rendre publiques que si l'on vous arrête ou vous assassine. Vous faites circuler l'information sur le lieu du dépôt sous la forme d'un fichier temporairement chiffré jusqu'à une date que vous avez choisie. Si vous êtes arrêté ou tué, l'information sera libérée à la date choisie et tous ceux ayant reçu le fichier sauront, sans que vous ayez à intervenir, où sont les informations que vous vouliez rendre publiques.

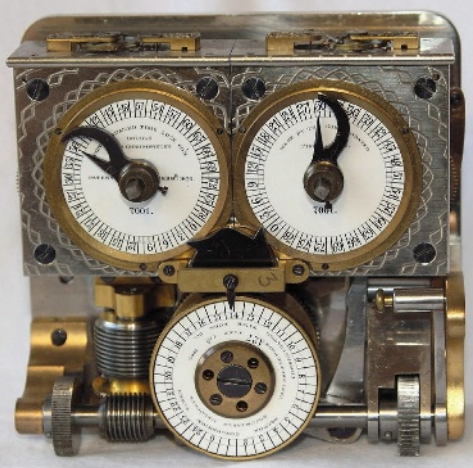
– Pour organiser une enchère, chaque acheteur intéressé dépose le prix qu'il est prêt à payer dans un message chiffré qui ne se libère qu'à la date de clôture des enchères. Plus généralement l'idée fonctionne pour les procédures

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

SERRURES À RETARDEMENT

1

Les serrures à retardement (*time lock boxes* en anglais), une fois enclenchées, ne peuvent pas s'ouvrir avant une heure programmée. Utilisées par les banques depuis plus d'un siècle, elles empêchent quiconque réussissant à entrer dans la salle des coffres, et même s'il connaît la combinaison d'un coffre, de l'ouvrir. Les modèles sont nombreux et intéressent les collectionneurs comme Mark Frank, qui a créé un magnifique site internet pour présenter sa collection, dont la photo ci-contre montre un exemplaire (www.my-time-machines.net/my_time_lock_collection.htm).



Serrure à retardement fabriquée en 1887 par la compagnie américaine Consolidated Time Lock.

de vote (non secret) où les électeurs sont éloignés et ne souhaitent dévoiler leur choix que lorsque chaque électeur a déposé le sien.

– Vous organisez un examen ou un concours dont les participants sont dispersés dans le monde entier. Sans avoir à vous soucier des délais et erreurs de transmission, vous leur envoyez la capsule temporelle contenant le sujet. Vous contrôlez que tous l'ont reçue et, à l'heure voulue, le sujet d'examen se dévoilera à tous.

COFFRES ET ORDINATEURS À RETARDEMENT

L'utilisation d'un coffre à retardement permet de maintenir secret un message jusqu'à la date programmée d'ouverture. Toutefois, le message n'est pas accessible à tout le monde à la date voulue. Un acteur puissant pourrait contrôler le coffre, l'ouvrir le premier et empêcher la diffusion de l'information déposée.

Pour éviter ce risque, vous pouvez mettre l'information dans plusieurs coffres en ne donnant l'information de leur emplacement qu'à certaines personnes. L'acteur puissant qui souhaite empêcher la diffusion de l'information ne connaîtra pas tous les emplacements des coffres.

On peut aussi imaginer qu'avec une serrure à retardement, on envoie un message à une date donnée, par un téléphone portable où un ordinateur, à une série de numéros de téléphone donnés, ou, mieux, on dépose à une adresse internet le message souhaité qui sera alors lisible dans le monde entier. Un ordinateur portable caché dans un coffre fermé (qui laisse passer les ondes !) et convenablement >

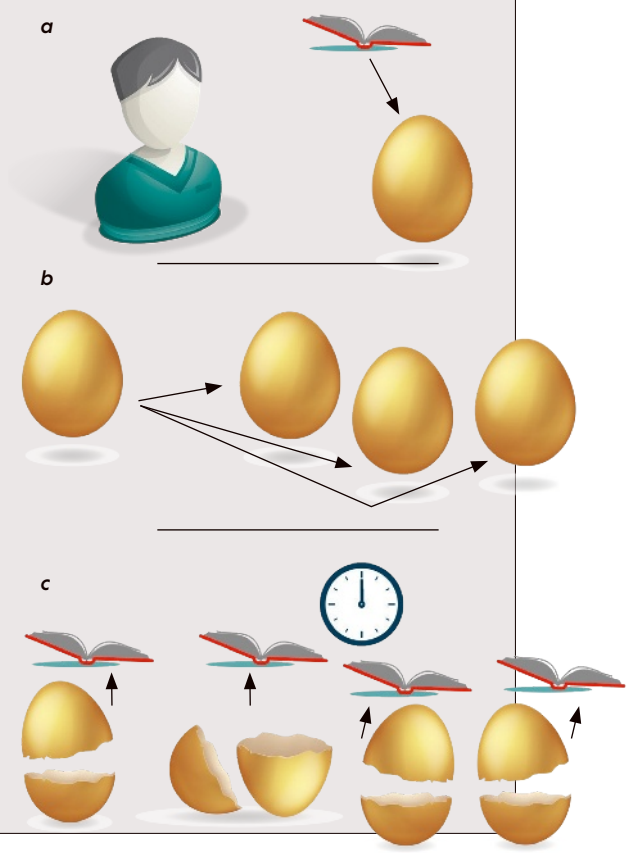
2

UNE CAPSULE TEMPORELLE IDÉALE

Monsieur Dupont veut cacher l'histoire de sa vie qu'il a soigneusement rédigée et déposée dans un fichier informatique de façon à ce que personne de son vivant ne puisse en prendre connaissance. Il fixe la date de levée du secret au 1er janvier 2100. Il crée un fichier informatique (capsule temporelle) programmé pour cette date *(a)*.

Il fait ensuite circuler la capsule temporelle, qui est multipliée sur le réseau, sans que personne ne puisse prendre connaissance du contenu *(b)*.

Le 1er janvier 2100, ceux qui détiennent la capsule réussissent sans mal à l'ouvrir et à prendre connaissance du document de M. Dupont, qui est mort depuis longtemps *(c)*.



En haut : © Frank Mark (http://www.my-time-machines.net/)
En bas : © Shutterstock.com/Nadia Jazmin Ochoa Merlin ; Newana/Pourla Science

3

UN SECRET PARTAGÉ EN MORCEAUX

Il est possible de partager un message M en n morceaux $M_1, M_2, \ldots, M_n$ de telle façon que l'on n'ait aucune information sur M tant que l'on ne dispose pas de tous les n morceaux. Expliquons comment. On suppose M donné sous forme binaire et ayant la longueur L.

Pour $M_1, M_2, \ldots, M_{n-1}$, on prend des suites de 0 et de 1 aléatoires, différentes et indépendantes, chacune de longueur L. Pour définir M_n, on procède bit par bit.

Pour le premier bit de M_n, on prend un 0 ou un 1 de façon que le nombre de 1 en première position dans les messages $M_1, M_2, \ldots, M_n$ soit pair si le premier bit de M est 0, et impair sinon.

Pour le deuxième bit de M_n, on procède de la même façon à partir des bits en deuxième position de M et de $M_1, M_2, \ldots, M_{n-1}$. Et ainsi de suite (la procédure est illustrée ci-dessous pour $n = 10$, sur un message court).

Connaître $M_1, M_2, \ldots, M_n$ permet de reconstituer M, mais connaître $n - 1$ de ces messages ne donne aucune information sur M.

On peut faire mieux et partager un message M en n morceaux de telle façon que :
– connaître k morceaux, quels qu'ils soient ($k < n$), redonne M ;
– connaître moins de k morceaux ne donne aucune information sur M.

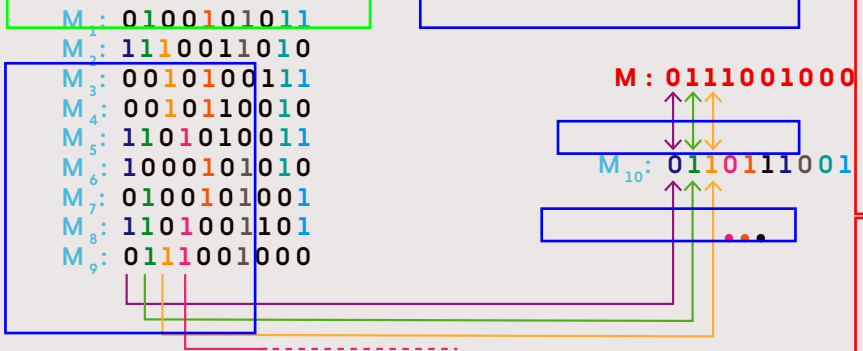
Plusieurs méthodes ont été proposées, dont celle d'Adi Shamir (« How to share a secret », *Communications of the ACM*, vol. 22(11), pp. 612-613, 1979).

Son idée repose sur le fait que disposer de k valeurs d'un polynôme P de degré $k - 1$ permet de le déterminer, mais que c'est impossible si l'on en connaît moins.

Le premier bit de M étant d_1, on commence par trouver un polynôme P_1 de degré $k - 1$ dont la valeur en 0 est d_1. Ensuite, pour chaque i de 1 à n, on fixe comme premier élément du message M_i la valeur $P_1(i)$.

On fait de même avec le second bit d_2 de M : on choisit un polynôme P_2 de degré $k - 1$ dont la valeur en 0 est d_2. Puis, pour chaque i de 1 à n, on fixe comme second élément du message M_i la valeur $P_2(i)$. Et ainsi de suite.

En conséquence :
– celui qui connaît k messages parmi $M_1, M_2, \ldots, M_n$ connaîtra le 1er bit de M, car il peut calculer le polynôme P_1. Il connaîtra le 2e bit de M, car il peut calculer le polynôme P_2. Etc.
– celui qui connaît moins de k messages parmi $M_1, M_2, \ldots, M_n$ ne peut rien connaître de M.



> programmé fera l'affaire : vous délivrerez le message à la date voulue.

Ces méthodes sont intéressantes, mais uniquement pour des délais assez courts ne dépassant pas quelques mois ou années, car les batteries du téléphone ou de l'ordinateur caché doivent tenir jusqu'au moment du déclenchement. Elles ne permettent pas d'envoyer un message un siècle à l'avance.

De plus, les solutions avec téléphone ou ordinateurs cachés ne produisent pas un fichier informatique qu'on laisse circuler et qui est tel que tous ceux le détenant à l'heure voulue en découvrent le message sans avoir à interagir avec autre chose. Elles ont aussi l'inconvénient d'être lourdes à mettre en œuvre, sans parler du risque que le dispositif caché soit découvert et arrêté ou détruit par accident. Réfléchissons à mieux.

FAIRE APPEL À UN OU PLUSIEURS TIERS DE CONFIANCE

Une idée évidente est celle du tiers de confiance. Vous confiez le message, placé dans une enveloppe cachetée par exemple, à un huissier en lui indiquant la date à laquelle il devra ouvrir l'enveloppe et en délivrer le contenu. Vous pouvez améliorer la robustesse du procédé en utilisant plusieurs tiers de confiance dont aucun ne pourra divulguer seul le message avant l'instant choisi par vous. Voici la méthode.

Vous découpez le message en n morceaux dont aucun ne permet d'avoir la moindre idée du message complet et dont même la connaissance de $n-1$ morceaux ne révèle rien (*voir l'encadré 3*). Vous confiez ces n morceaux à n tiers de confiance en leur demandant de se contacter les uns les autres à la date voulue pour s'échanger les bouts du message, le reconstituer et le rendre public.

Le risque sera cependant que l'un des tiers de confiance soit indisponible le jour voulu, malade ou décédé par exemple. Cela empêcherait que le message soit reconstitué et délivré. Mais il existe des procédés de découpage d'une information, inventés en 1979 par Adi Shamir et George Blakley, qui résolvent le problème. Le message est découpé en n morceaux qui ont la propriété que dès que l'on dispose de k morceaux ($k<n$) du découpage, il devient possible de retrouver tout le message, et qu'avec moins de k morceaux, rien ne peut être dévoilé du message découpé (*voir l'encadré 3*).

Ces idées résolvent sans doute un certain nombre de cas, mais, comme précédemment, ce ne sont que des méthodes partiellement satisfaisantes : elles ne produisent pas une capsule temporelle, c'est-à-dire un message qui libère seul son information à la date voulue à ceux qui le détiennent.

Explorons d'autres idées. Ronald Rivest

© Pour la Science

(le R du protocole de chiffrement à double clé RSA), Adi Shamir (le S de RSA) et David Wagner ont proposé en 1996 une méthode consistant à utiliser un protocole de chiffrement dont on efface volontairement la clé de déchiffrement. La seule façon de lire le message chiffré est alors de mener une attaque par calculs massifs dont on évalue la durée. Le message est illisible pendant tout le temps nécessaire aux calculs. Ceux qui les effectuent obtiennent au bout du temps prévu le moyen de déchiffrer le message. Cette fois, on a bien un message chiffré qui peut circuler et même être dupliqué et qui est protégé en lui-même par un système ne permettant pas d'en lire le contenu avant une certaine date. La méthode est astucieuse, mais on doit noter deux points.

UN RETARD IMPOSÉ PAR DES CALCULS NON PARALLÉLISABLES

Tout d'abord, le message ne sera déchiffré que par ceux qui effectueront le calcul massif et l'auront poursuivi pendant la durée nécessaire. C'est coûteux et cela demande des compétences; le message ne sera donc accessible qu'à certains acteurs très particuliers ayant accepté de s'en occuper en continu. De plus, si vous ne vous occupez pas de la capsule temporelle dès qu'elle est émise, vous ne pourrez disposer du message qu'avec retard.

Ensuite, on ne connaît pas à ce jour de méthode permettant d'ajuster avec précision la difficulté de la recherche de la clé. On peut d'ailleurs remarquer que, en 1996, les trois chercheurs ont décrit leurs idées en évoquant un système où le calcul massif consistait à calculer successivement des carrés de nombres entiers.

En 1999, un défi a été lancé concernant ce procédé, le « LCS35 Time Capsule Crypto-Puzzle ». Le message caché ne devait pouvoir se libérer que trente-cinq ans plus tard environ, donc vers 2034. Cette évaluation de la résistance du problème tenait compte de la loi de Moore, selon laquelle nos capacités de calcul doublent tous les dix-huit à vingt-quatre mois environ. Mais les progrès en matière de calcul de carrés de nombres entiers ont été plus rapides que prévu et le défi est tombé en 2019, quinze ans plus tôt que ce qui était programmé. Ronald Rivest a dû reconnaître qu'il s'était trompé dans son anticipation.

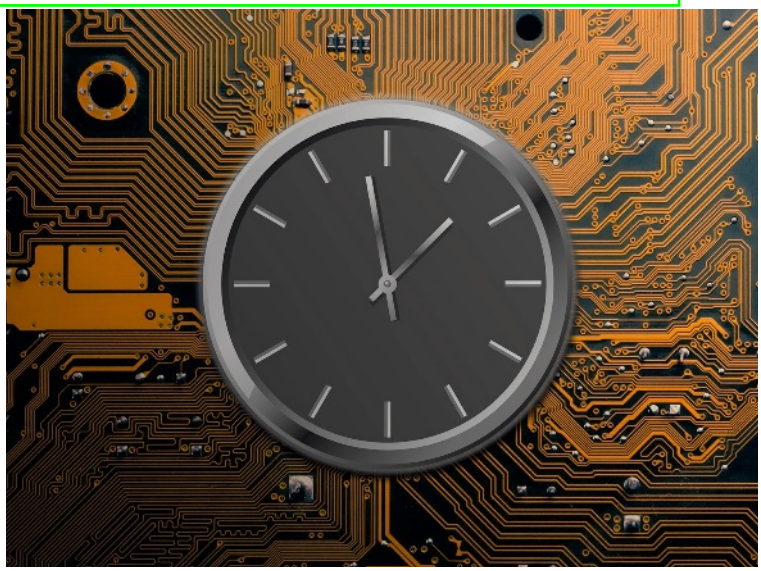
L'erreur ne provient pas de la loi de Moore, mais de la réalisation de puces spécialisées dans le calcul de carrés et des progrès faits par les algorithmes de calcul du carré d'un nombre entier. Les informaticiens et les mathématiciens travaillent en effet à des avancées en termes d'algorithmes ou dans la conception des dispositifs de calcul qui accélèrent la résolution de certains problèmes particuliers indépendamment des progrès de l'électronique de base, lesquels sont les seuls que la loi de Moore prend en compte.

Le calcul de carrés successifs était pourtant « intrinsèquement séquentiel », ce qui signifie que l'utilisation de calculs parallèles ne pouvait pas aider à accélérer sa réalisation. Aujourd'hui, d'autres méthodes – les VDF ou fonctions vérifiables à délai – ont été proposées pour concevoir des énigmes dont la résolution exige une quantité de calcul impossible à mener en parallèle et donc demandent un temps de calcul impossible à raccourcir sensiblement. Cependant, la durée minimale que de tels calculs exigent reste imprécise. >

4 UN DÉFI DE CALCUL TROP VITE RÉSOLU

Une idée pour concevoir des capsules temporelles est de chiffrer le message avec un procédé dont la clé de déchiffrement ne se découvre qu'en menant un long calcul dont la durée amènera à la date fixée pour la libération du message. Proposée par Ronald Rivest, Adi Shamir et David Wagner en 1996, cette idée ne permet pas de fixer avec une grande précision la date de libération du message, car selon qu'on aura consacré beaucoup de moyens ou non pour mener le calcul, on arrivera plus ou moins vite au résultat provoquant l'ouverture.

Les calculs nécessairement longs proposés par les chercheurs étaient des calculs enchaînés de carrés de nombres entiers. Un problème de ce type fut proposé en 1999 à titre de défi (https://en.wikipedia.org/wiki/LCS35) ; il devait tenir trente-cinq ans, mais il a été résolu en moitié moins de temps car on a su améliorer les algorithmes de calcul de carrés et créer des processeurs spécialisés (voir « Programmers solve MIT's 20-year-old cryptographic puzzle », laboratoire CSAIL du MIT, avril 2019 : https://www.csail.mit.edu/news/programmers-solve-mits-20-year-old-cryptographic-puzzle).



© Shutterstock.com/ds_vector/Momenthum Fotograph

> Pour atteindre l'objectif recherché, on peut s'appuyer sur les techniques d'« offuscation » de programmes et sur l'existence d'horloges publiques sécurisées ou aux propriétés particulières.

DES PROGRAMMES OFFUSQUÉS QUI SURVEILLENT L'HEURE

L'offuscation de programmes consiste à écrire des programmes informatiques que tout le monde peut avoir et faire fonctionner, mais dont la logique de fonctionnement est tellement embrouillée et masquée que même en étudiant soigneusement le programme, on ne saura pas bien ce qu'il fait. Cela empêche qu'on les modifie ou qu'on exploite les idées qui ont conduit à leur mise au point.

Si l'on maîtrise l'offuscation, on peut créer un programme à retardement livrant un message à une date fixée par le créateur: une fois lancé sur une machine ayant accès à internet, le programme offusqué lit l'heure sur un ou plusieurs sites qui la publient en continu. Quand l'heure trouvée dépasse la date programmée, le programme déchiffre l'information qui est cachée en lui et la fait alors apparaître en clair. Si l'information qu'on veut libérer est très volumineuse, l'information libérée sera la clé de déchiffrement du fichier chiffré contenant cette information, le programme offusqué ne servant qu'à cacher la clé de déchiffrement.

Il existe de nombreux sites publiant l'heure, en particulier l'horloge parlante (http://www.horlogeparlante.com). On peut imaginer qu'ils fonctionneront encore longtemps et suivront le même mode de publication. Si l'on craint qu'ils soient compromis ou simplement arrêtés, l'utilisation de plusieurs horloges dispersées en des endroits divers du monde fournira une garantie renforcée. Le programme consultera par exemple n horloges et considérera comme certain que le moment attendu est atteint seulement si k horloges parmi n l'indiquent.

Cette méthode est moins risquée que celle où l'on confie le message à un tiers de confiance: les horloges utilisées ne sont pas informées du message caché dans le programme offusqué, et ne savent même pas qu'on les utilise. Toutefois, certains résultats théoriques semblent indiquer qu'aucune méthode parfaite d'offuscation n'existe. D'autres résultats récents utilisant une définition moins stricte de l'offuscation montrent qu'on peut réussir, mais au prix d'un ralentissement du fonctionnement du programme offusqué.

C'est pourquoi on a recherché des méthodes ne faisant pas appel à l'offuscation. L'une d'elles, décrite en 2004 par Aldar Chan et Ian Blake, et perfectionnée en 2006 par Julien Cathalo, Benoît Libert et Jean-Jacques Quisquater, décrit comment une horloge de référence fiable peut produire et publier des informations qui permettront à quelqu'un voulant émettre un message à retardement de le faire sans que l'horloge ait à connaître le message temporairement chiffré ni même savoir qu'un tel message existe.

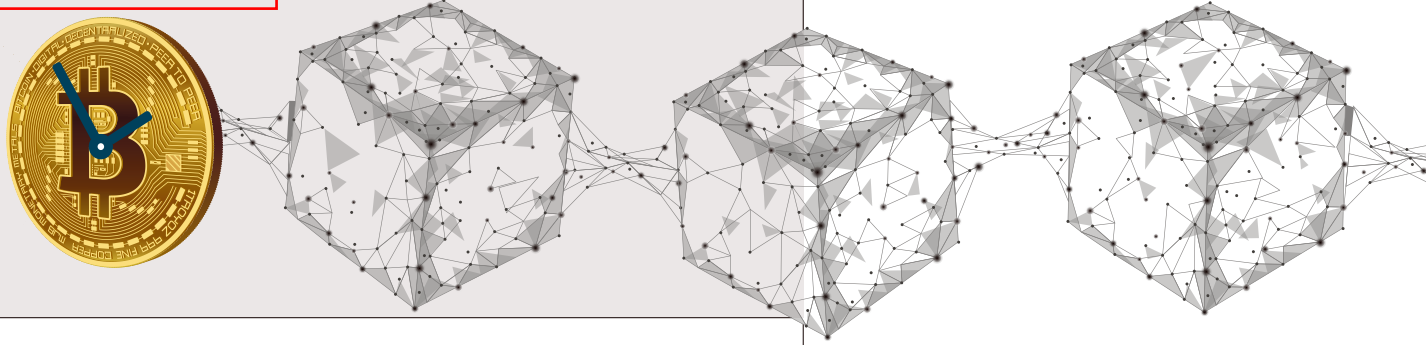
L'horloge produit à la date voulue des informations permettant de déchiffrer les fichiers secrets. Ni le créateur de la capsule temporelle ni ceux à qui elle est adressée n'ont à interagir avec l'horloge qui diffuse les messages permettant de déchiffrer les capsules temporelles ayant atteint l'instant de libération. Ces méthodes permettent aussi de préserver l'anonymat des utilisateurs qui créent les capsules temporelles ou les lisent l'heure venue.

Malheureusement, celui qui fait fonctionner horloge peut produire avant l'heure les clés de déchiffrement des capsules temporelles. La solution est donc encore imparfaite.

5 LA SOLUTION BLOCKCHAIN

La technologie des blockchains qui est utilisée pour émettre et faire circuler des cryptomonnaies telles que le Bitcoin met à la disposition de tous une horloge décentralisée dont le fonctionnement ne peut être perturbé par personne.

Cette technologie permet de concevoir des capsules temporelles dont la sûreté n'est pas liée à la confiance accordée à un acteur particulier. Cette dernière avancée dans la conception de capsules temporelles de plus en plus proches de l'idéal, décrit dans l'encadré 2, est due à Jia Liu, de l'université de Surrey, Tibor Jager et Saqib Kakvi, de l'université de Paderborn, et Bogdan Warinschi, de l'université de Bristol, et a été publiée en 2018 ***(voir la bibliographie)*****.**



© Shutterstock.com/Iurii Motov/LuckyStep

Depuis quelques années, il est devenu possible de disposer de l'équivalent d'une horloge de référence sans avoir à craindre qu'elle puisse être utilisée en avance. La méthode publiée en 2018 par Jia Liu, Tibor Jager, Saqib Kakvi et Bogdan Warinschi s'appuie sur les blockchains (ou chaînes de blocs) publiques, comme celle de la monnaie cryptographique Bitcoin en fonctionnement depuis 2009.

La blockchain du Bitcoin est un fichier recopié à l'identique en chaque nœud d'un réseau informatique, ce fichier étant géré et surveillé par chaque nœud de ce réseau. Le fichier évolue toutes les dix minutes environ par l'ajout d'une nouvelle page (ou bloc) et c'est cet ajout périodique qui fixe l'avancée de l'horloge. Son fonctionnement n'est pas extrêmement précis, car l'intervalle de dix minutes n'est qu'une moyenne.

UNE BLOCKCHAIN POUR UNE HORLOGE DÉCENTRALISÉE

Cependant, cette horloge décentralisée n'est aux mains de personne en particulier. C'est donc l'ensemble des nœuds du réseau, environ 10 000 répartis dans le monde entier, qu'il faudrait soudoyer pour fausser le signal qu'elle émet. En perturber le fonctionnement est pratiquement impossible, car l'ajout d'une nouvelle page exige que le réseau fasse une quantité colossale de calculs, aujourd'hui environ 10^{20} calculs de la fonction SHA256 par seconde. Il y a donc bien, comme pour les méthodes proposées par Adi Shamir et ses collègues, un calcul important à faire qui régule l'horloge. Cependant, la situation est très différente pour trois raisons rassurantes.

Tout d'abord, ce ne sont pas ceux qui créent ou veulent lire le contenu des capsules temporelles en s'appuyant sur cette horloge qui font les calculs, mais les nœuds du réseau qui sont motivés par les gains payés en nouveaux bitcoins créés pour cette participation au fonctionnement du réseau.

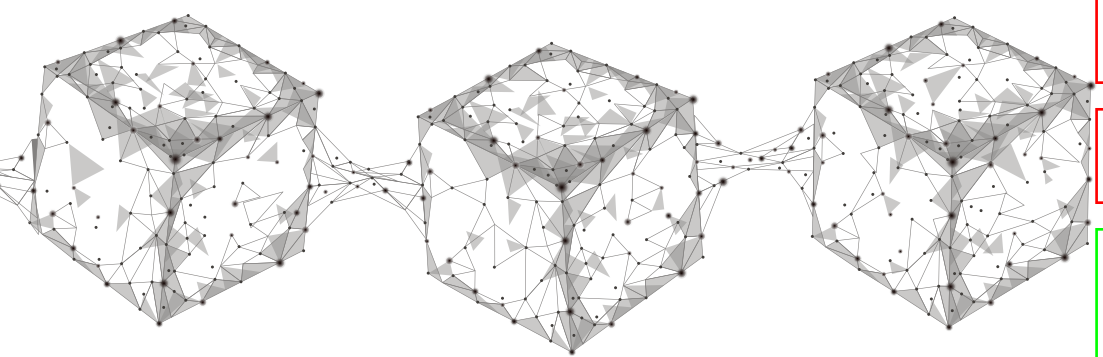
Ensuite, la difficulté du calcul à mener pour faire avancer l'horloge d'une étape de dix minutes se réajuste automatiquement tous les quatorze jours pour prendre en compte l'évolution de la capacité totale du réseau: la difficulté augmente si le réseau a accru sa capacité à calculer, elle diminue sinon. Ce réajustement annule l'évolution de puissance du réseau et maintient sur le long terme la durée moyenne d'une étape à dix minutes. Les progrès de l'électronique, ou d'autres natures n'accéléreront pas l'horloge.

Enfin, quelqu'un qui voudrait seul accélérer brusquement le calcul pour produire de nombreuses étapes rapprochées de l'horloge doit disposer d'une capacité de calcul propre de l'ordre de grandeur de celle cumulée de tous les nœuds validateurs du réseau, ce qui est très difficile à imaginer. Une dernière raison rend improbable la manipulation de l'horloge du bitcoin par un seul acteur: celui qui pourrait le faire pourrait aussi exploiter cette capacité de calcul pour s'approprier une grande partie des nouveaux bitcoins créés, dont la valeur équivaut à plusieurs milliards de dollars par an… ce qu'il préférera sans doute!

La blockchain semble donc nous approcher de l'idéal souhaité. Le système ne repose pas sur des tiers de confiance et il assure l'anonymat des créateurs de capsules temporelles et de ceux qui veulent les lire. Le message secret circule et se libère indépendamment de celui qui l'a émis, personne qui peut avoir disparu au moment de l'ouverture. Et lire le message une fois la date atteinte ne demande pas de capacité de calcul particulière et n'exige pas de s'en être occupé depuis son émission.

D'autres idées s'appuyant sur la notion de *smart-contract* du réseau Ethereum ont aussi été proposées. Ces méthodes ne sont malheureusement sans doute pas assez sûres à très long terme. En effet, comment être certain que, dans dix ans ou plus, les réseaux Bitcoin et Ethereum continueront de fonctionner, qu'ils auront résisté à toutes les attaques et n'auront pas été délaissés pour de meilleurs modèles de blockchain?

Le problème est difficile, mais la science cryptographique avance, en produisant d'année en année d'étonnants résultats! ■



BIBLIOGRAPHIE

W.-J. Lai *et al.*, **A fully decentralized time-lock encryption system on blockchain**, *2019 IEEE International Conference on Blockchain*, IEEE, 2019.

G. Branwen, **Time-Lock Encryption**, 2019 (https://www.gwern.net/Self-decrypting-files).

J. Liu *et al.*, **How to build time-lock encryption**, *Designs, Codes and Cryptography*, vol. 86, pp. 2549-2586, 2018 (https://bit.ly/36Rrx0u).

J. Cathalo *et al.*, **Efficient and non-interactive timed-release encryption**, *International Conference on Information and Communications Security*, Springer, 2005.

A. Chan et I. F. Blake, **Scalable, server-passive, user-anonymous timed release cryptography**, *25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05)*, IEEE, 2005.

R. Rivest, **Description of the LCS35 Time Capsule Crypto-Puzzle**, 1999 (https://bit.ly/3jKRQt1).

R. Rivest *et al.*, **Time-lock puzzles and timed-release crypto**, Technical Report MIT/LCS/TR-684, MIT Laboratory for Computer Science, 1996 (https://bit.ly/3nvdu72).

LES AUTEURS

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

BENOÎT SEMIN
chercheur CNRS au laboratoire PMMH (Physique et mécanique des milieux hétérogènes), à Paris

BIEN VENTILER POUR BIEN RESPIRER

Pour limiter la propagation du Covid-19, il faut aérer les lieux clos. Mais quand et pendant combien de temps ? Pour répondre, à défaut de mesurer la quantité de microbes dans l'air, on peut s'appuyer sur la concentration de dioxyde de carbone de l'air que l'on respire.

Renouveler l'air dans les lieux clos : ce thème a resurgi dans le débat public avec la pandémie de Covid-19. En effet, le virus impliqué se transmet notamment par voie aérienne, d'où la recommandation actuelle de bien ventiler les lieux clos pour contrer sa propagation. Cependant, bien au-delà de la crise épidémique, une bonne ventilation est importante pour la santé et le bien-être en général. Comment s'assurer qu'elle est satisfaisante ? En mesurant le taux de dioxyde de carbone, le CO_2, dans l'air. Ce gaz carbonique est produit par notre respiration et son taux permet donc d'estimer la qualité de l'aération.

ÉVITER DE DÉPASSER 1000 PPM DE CO_2

Dans l'air extérieur, la concentration moyenne de CO_2 est d'environ 0,04 %, c'est-à-dire que 1 molécule sur 2500 est une molécule de CO_2. Pour éviter d'avoir à manipuler des chiffres décimaux, on utilise plutôt la « partie par million », ou ppm en abrégé : on a donc ici une concentration d'environ 400 ppm, avec, en ville, des variations de quelques dizaines de ppm dues à la pollution ou à la situation météorologique.

Lorsque nous sommes à l'extérieur, l'air que nous expirons se dilue rapidement dans l'immensité de l'air ambiant ; notre respiration n'a donc aucune conséquence sur la concentration de CO_2. Tel n'est pas le cas dans un espace clos. Dans l'air expiré, la concentration de CO_2 atteint environ 40 000 ppm (soit 4 %). On estime ainsi que lors d'une respiration normale, un adulte rejette 18 litres de CO_2 par heure à pression atmosphérique. Dans un espace clos, la concentration de CO_2 augmente donc progressivement.

Pour fixer les idées, considérons une pièce où chaque personne dispose de 10 mètres cubes d'air. Cela correspond par exemple à 5 personnes dans un salon de 20 mètres carrés et 2,5 mètres de hauteur. Si la pièce est étanche et non ventilée, la concentration de CO_2 augmente linéairement avec le temps. Au bout de 1 heure, 18 litres de CO_2 s'ajouteront aux 10 mètres cubes (soit 10 000 litres) d'air par personne : la concentration sera donc augmentée de 1800 ppm et atteindra 2200 ppm si l'air de la pièce avait initialement la même composition que l'air extérieur.

Dans un lieu clos, la respiration des personnes présentes accroît assez vite la concentration en CO_2 de l'air. Pour rester à moins de 1 500 ppm de CO_2 dans une salle offrant une dizaine de mètres cubes d'air par personne, il faut renouveler l'air à peu près toutes les demi-heures. À cette fin, ouvrir grand les fenêtres quelques minutes suffit.

Or des études ont montré qu'au-delà d'une teneur en CO_2 de 2 000 ppm, nos capacités cognitives commencent à s'altérer, et cela d'autant plus qu'elles sont de niveau élevé (prise de décision, réflexion…). C'est pourquoi les valeurs maximales conseillées pour la concentration de CO_2 en intérieur se situent d'habitude entre 1 000 et 1 500 ppm ; elles s'appliquent notamment aux bâtiments résidentiels et aux bureaux.

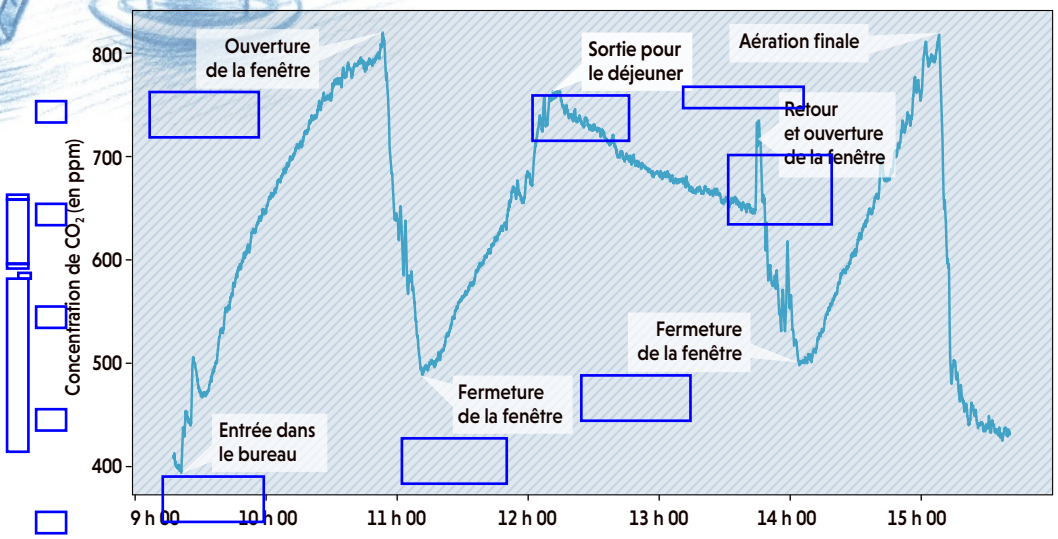
Comment ne pas dépasser ces seuils ? Par exemple en faisant appel à une ventilation mécanique. La norme européenne de ventilation dans les locaux non résidentiels (EN 13779) préconise un débit de 29 mètres cubes par heure et par personne pour que la qualité de l'air soit « modérée ». D'où sort ce chiffre ?

Après une phase transitoire où elle varie, la teneur en CO_2 se stabilise lorsque

© Bruno Vacaro

ÉVOLUTION RAPIDE DE LA TENEUR EN CO_2

Dans un lieu clos, la concentration en CO_2 de l'air augmente vite lorsque des personnes sont présentes, chaque adulte rejetant, par sa respiration, environ 18 litres par heure de ce gaz à pression atmosphérique. Mais l'ouverture des fenêtres permet de revenir très rapidement à une concentration normale. C'est ce qu'illustre le graphique ci-dessous, issu des mesures par l'un des auteurs (Jean-Michel Courty) de la teneur en CO_2 dans son bureau, au fil de ses allées et venues et des ouvertures et fermetures de la fenêtre.



le gaz carbonique produit par la respiration est évacué à chaque instant par la ventilation. Or cette quantité évacuée, en supposant que l'air est suffisamment brassé pour être homogène, n'est autre que le produit du débit de la ventilation par la concentration en CO_2. On trouve donc que, en régime stationnaire, la concentration de CO_2 est égale à la somme de la concentration atmosphérique (400 ppm) et du rapport du débit produit sur le débit évacué. Ainsi, 18 litres de CO_2 par heure sur 29 mètres cubes d'air par heure donnent un supplément de 620 ppm de CO_2, d'où une concentration totale de 1020 ppm.

Ce chiffre est acceptable, mais il frôle déjà les maxima recommandés. Remarquons aussi que ce résultat, et donc le dimensionnement d'une ventilation, ne dépend pas du volume de la pièce, mais seulement du nombre de ses occupants. Le respect de la norme nécessite donc d'estimer l'occupation maximale des locaux.

AÉRER QUELQUES MINUTES TOUTES LES DEMI-HEURES

En l'absence de ventilation mécanique, il reste l'aération naturelle. Pour en revenir à l'exemple d'une personne dans 10 mètres cubes d'air, on atteint 1300 ppm de CO_2 au bout d'une demi-heure; il faut alors ouvrir grand les fenêtres pour renouveler complètement l'air de la pièce. Plusieurs mécanismes peuvent y contribuer: le vent, bien entendu, mais aussi la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Celle-ci engendre des différences de densité de l'air et des mouvements de >

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

© Jean-Michel Courty/Pour la Science (graphique)

> convection ascendants et descendants à travers les ouvertures.

Il est cependant beaucoup plus difficile d'estimer les débits correspondants. En égalant la force ascensionnelle qui s'exerce sur l'air chaud et le frottement aérodynamique avec l'air ambiant, on calcule des vitesses de l'ordre de 0,5 mètre par seconde pour des écarts de température de 10 °C. En supposant que la moitié de la surface des fenêtres, disons 4 mètres carrés pour notre salon de 20 mètres carrés, permet de faire rentrer de l'air de l'extérieur tandis que l'autre moitié sert à évacuer l'air vicié, on renouvellerait totalement les 50 mètres cubes d'air du salon en 50 secondes grâce à un débit phénoménal de 3600 mètres cubes par heure.

Cette estimation de débit est un peu trop élevée, et ce temps trop court, mais ces chiffres suggèrent ce que chacun a pu vérifier, à savoir que la convection naturelle parvient à renouveler l'air d'une pièce en quelques minutes. Cette durée est d'ailleurs suffisamment brève pour éviter, l'hiver, de refroidir les meubles et les murs ; le confort thermique n'est par conséquent que momentanément perturbé ! Mais tout cela suppose que la convection soit possible : sans vent et sans grand écart de température, il faut se résigner, à la mi-saison, à laisser les fenêtres ouvertes en permanence pour aérer.

MESURER LA TENEUR EN CO_2

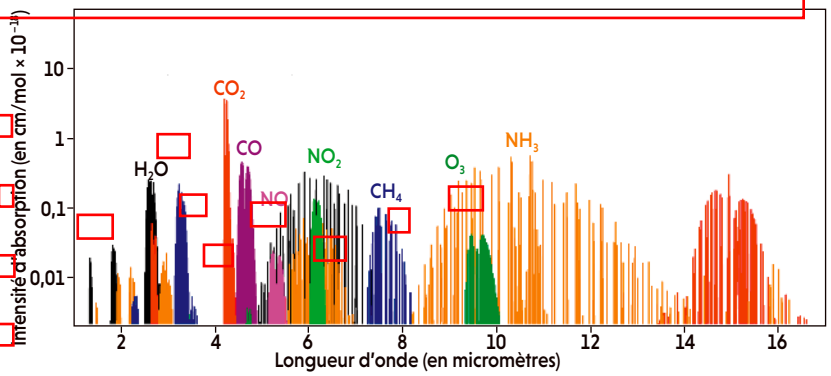
Comment s'assurer que le renouvellement de l'air est suffisant ? Dans l'industrie du bâtiment, un contrôle standard consiste à mesurer le taux de CO_2 de l'air intérieur. S'il existe des appareils à usage professionnel, on trouve désormais dans le commerce des détecteurs peu coûteux que l'on peut piloter avec une carte Arduino. Ces appareils, qualifiés de NDIR (pour *nondispersive infrared spectroscopy*, « spectroscopie infrarouge non dispersive »), mesurent l'absorption de la lumière infrarouge par les molécules de l'air.

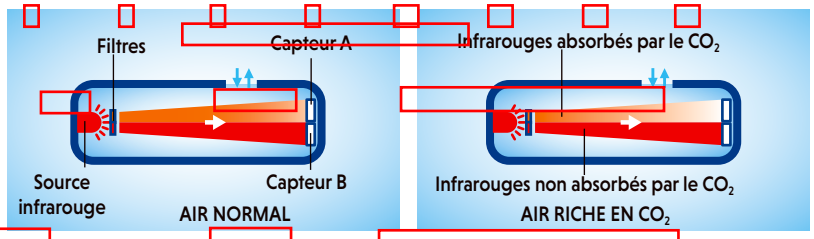
En effet, le gaz carbonique absorbe les infrarouges autour d'une longueur d'onde de 4,3 micromètres, qui excite des modes de vibration de ses liaisons carbone-oxygène. Cette valeur est éloignée des bandes spectrales d'absorption des autres molécules de l'air, telles que le dioxygène (O_2), le monoxyde de carbone (CO) et l'eau : la mesure de l'absorption est donc très sélective (*voir l'encadré ci-dessus*). À 400 ppm de CO_2, l'intensité d'un rayonnement vers 4 micromètres de longueur d'onde diminue de 2 % au bout de 5 centimètres. Cela semble peu, mais il faut s'en contenter si l'on veut un dispositif de mesure de petite taille.

C'est pourquoi les bons détecteurs NDIR effectuent des mesures différentielles. Ils comportent une source émettant dans l'infrarouge et deux capteurs, l'un sensible aux longueurs d'onde non absorbées par le CO_2 et qui sert de référence, l'autre sensible autour de la longueur d'onde de 4,3 micromètres, absorbée par le CO_2. L'intensité reçue par le second capteur varie donc avec la concentration de CO_2, contrairement à celle reçue par le premier, et la différence permet de déterminer la concentration de CO_2. Ainsi, avec un tel appareil que l'on trouve pour quelques dizaines d'euros, chacun peut vérifier si l'air qu'il respire est suffisamment renouvelé. ■

DÉTECTER LE CO_2 AVEC DES INFRAROUGES

Le dioxyde de carbone présente un pic d'absorption du rayonnement à 4,3 micromètres de longueur d'onde, dans l'infrarouge. Ce pic d'absorption est bien séparé de ceux des autres gaz présents dans l'atmosphère *(voir le graphique)* et offre donc un moyen commode de détecter le CO_2 et de mesurer sa concentration. Les détecteurs NDIR comportent ainsi deux capteurs, l'un, A, opérant à la longueur d'onde du pic d'absorption, l'autre, B, opérant à d'autres longueurs d'onde, non absorbées *(voir le schéma)*. Ainsi, le signal du capteur A dépend de la concentration en CO_2 de l'air traversé par le faisceau infrarouge, tandis que le capteur B produit un signal indépendant de cette concentration. Grâce à cette détection différentielle, les appareils NDIR mesurent la concentration de CO_2. Contrairement à d'autres types de détecteurs de CO_2, ils ne nécessitent pas de recalibrage régulier et restent opérationnels pendant plusieurs années.





BIBLIOGRAPHIE

R. K. Bhagat *et al.*, **Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 903, F1, 2020.

U. Satish *et al.*, **Is CO_2 an indoor pollutant ? [...]**, *Environ. Health Perspect.*, vol. 120(12), pp. 1671-1677, 2012.

J. Hodgkinson et R. P. Tatam, **Optical gas sensing : A review**, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24(1), 012004, 2012.

P. F. Linden, **The fluid mechanics of natural ventilation**, *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, vol. 31, pp. 201-238, 1999.

© D. Popa et F. Udrea, Sensors, vol. 19(9), 2076, 2019 (graphique) ; © Bruno Vacaro (schémas détecteur)

POUR LA SCIENCE
THEMA

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

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

3,99 €

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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi

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

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

L'AUTEUR

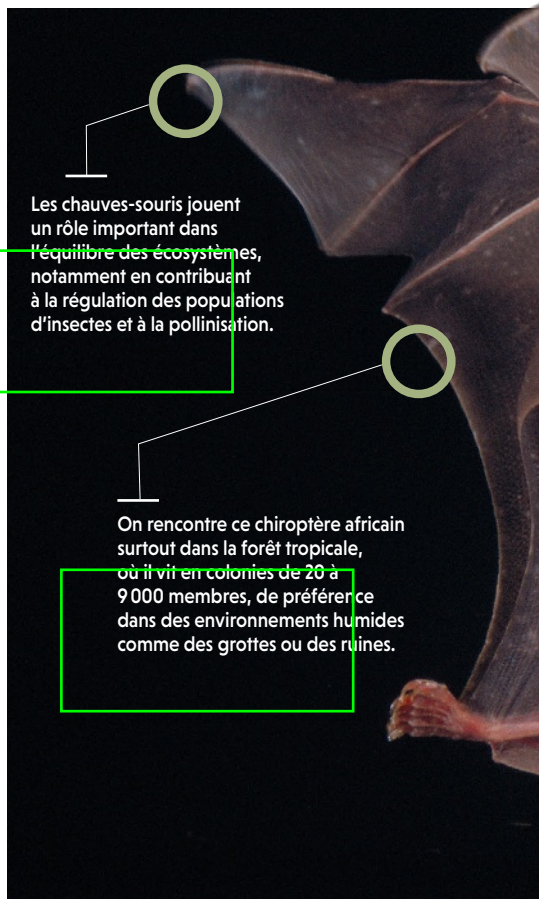
HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie évolutive à Sorbonne Université, à Paris

DES CHAUVES-SOURIS ET DES VIRUS

Les chiroptères véhiculent des virus létaux pour nombre de mammifères sans pour autant en souffrir. Leur secret? Un étonnant système immunitaire…

Rassemblées dans l'ordre des chiroptères, les chauves-souris sont les seuls mammifères au vol battu. Mais ces animaux nocturnes n'ont pas l'aura des oiseaux, qui séduisent par leurs ramages et leurs plumages. Ils ont même une réputation particulièrement mauvaise depuis le début de l'épidémie de Covid-19. En effet, il apparaît qu'ils ont joué un rôle clé dans l'émergence du coronavirus SARS-CoV-2, responsable de l'épidémie. Or ce virus s'ajoute à une longue liste d'agents hautement pathogènes dont les chauves-souris sont aussi des réservoirs. Comment les chiroptères sont-ils devenus de tels «viviers»? Aujourd'hui, grâce notamment à l'étude du génome de plusieurs espèces, on commence à y voir plus clair: leur trajectoire évolutive les a dotés d'un système immunitaire hors norme, d'une tolérance étonnante envers les virus.

En 2002, Daniel Haydon, de l'université d'Edimbourg, en Écosse, a redéfini le concept de réservoir en montrant que ce dernier doit se référer à une population cible. Il se compose ainsi de populations animales où l'agent pathogène se maintient de manière permanente et à partir desquelles l'infection se transmet à la population cible – les humains pour le médecin (on parle de zoonose), les animaux d'élevage pour le vétérinaire. À la différence de l'espèce cible, l'espèce réservoir n'est pas rendue malade par l'agent pathogène. Les chauves-souris semblent néanmoins sortir de l'ordinaire, car elles véhiculent de nombreux virus létaux pour de nombreux mammifères cibles. Ainsi, le grand rhinolophe (*Rhinolophus discolor*) est réservoir du SARS-CoV-1, le coronavirus responsable de l'épidémie du Sras (syndrome respiratoire aigu sévère) qui a sévi en Chine puis dans d'autres pays en 2003-2004, et la roussette d'Égypte (*Rousettus aegyptiacus*) porte le virus de Marburg, proche du virus Ebola, source d'une épidémie en 2000 en République démocratique du Congo, puis d'une autre en 2005 en Angola.



Les chauves-souris jouent un rôle important dans l'équilibre des écosystèmes, notamment en contribuant à la régulation des populations d'insectes et à la pollinisation.

On rencontre ce chiroptère africain surtout dans la forêt tropicale, où il vit en colonies de 20 à 9 000 membres, de préférence dans des environnements humides comme des grottes ou des ruines.

© Getty images/David A. Northcott

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

EN CHIFFRES

34

Le taux métabolique des chauves-souris en vol (la quantité d'énergie qu'elles consomment) est 34 fois supérieur à celui au repos. Leur température dépasse alors parfois 41 °C.

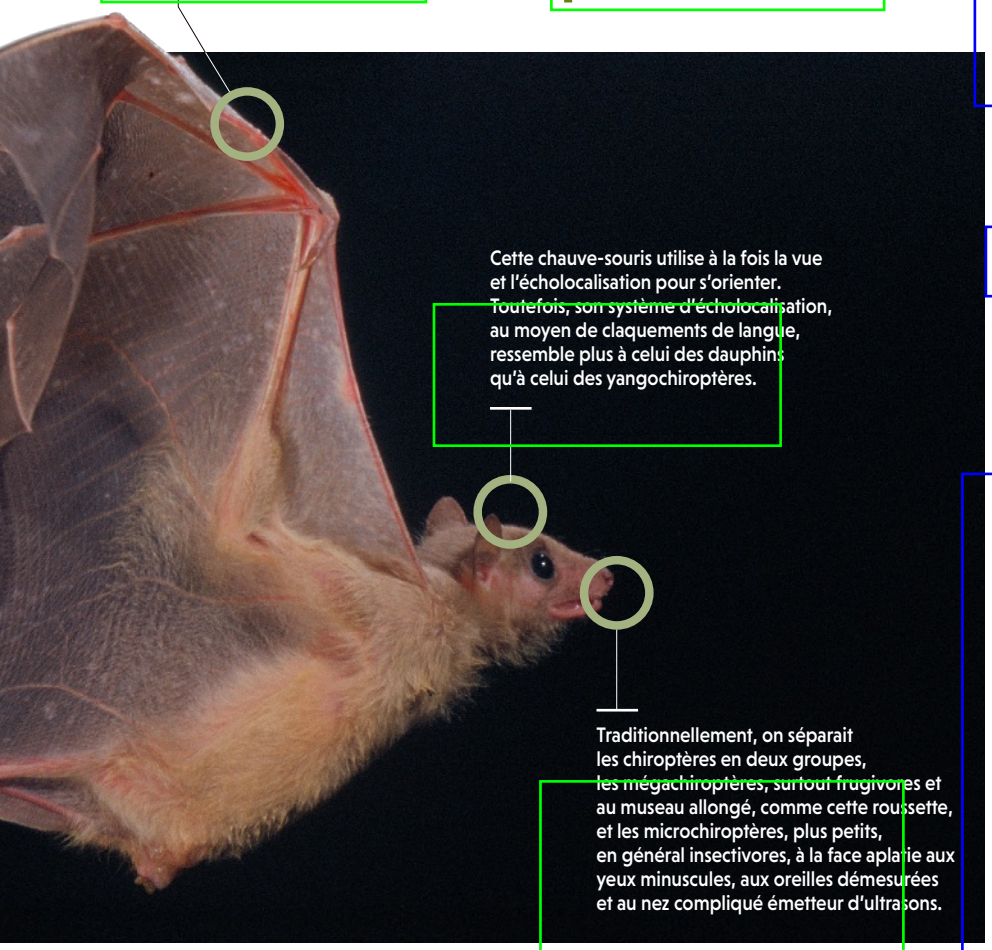
1/4

Sur les 5 100 espèces de mammifères placentaires (c'est-à-dire sans les marsupiaux et les monotrèmes), un peu moins de la moitié (2 250, soit 44 %) sont des rongeurs et un peu plus d'un quart (1 400, soit 27 %) sont des chauves-souris. Les mammifères les plus connus (ruminants, carnivores, cétacés…) n'en constituent donc qu'un peu plus d'un quart (1 450, soit 29 %).

35

C'est le nombre de familles de gènes qui ont changé de taille chez les chiroptères par rapport aux autres mammifères.

Les phylogénies moléculaires répartissent à présent les chauves-souris en deux sous-ordres, les yangochiroptères, rassemblant 14 familles de microchiroptères, et les yinptérochiroptères, comprenant les mégachiroptères et 5 familles de microchiroptères.



Cette chauve-souris utilise à la fois la vue et l'écholocalisation pour s'orienter. Toutefois, son système d'écholocalisation, au moyen de claquements de langue, ressemble plus à celui des dauphins qu'à celui des yangochiroptères.

Traditionnellement, on séparait les chiroptères en deux groupes, les mégachiroptères, surtout frugivores et au museau allongé, comme cette roussette, et les microchiroptères, plus petits, en général insectivores, à la face aplatie aux yeux minuscules, aux oreilles démesurées et au nez compliqué émetteur d'ultrasons.

Roussette d'Égypte
(Rousettus aegyptiacus)
Taille : entre 12 et 19 cm
Envergure des ailes : environ 60 cm
Durée de vie : environ 10 ans

Comment ces animaux survivent-ils à des infections dues à de tels virus ? Pour le savoir, deux approches ont été suivies : l'étude de génomes complets et l'infection de cellules en culture. Il y a deux ans, une équipe américaine conduite par Thomas Kepler, de l'université de Boston, et Gustavo Palacios, de l'Institut de recherche médicale de l'armée des États-Unis sur les maladies infectieuses, à Frederick, dans le Maryland, a comparé le génome de la roussette d'Égypte à ceux de 14 autres mammifères, dont l'humain. Elle a ainsi remarqué, chez le chiroptère, des originalités concernant des familles de gènes liés au système immunitaire inné.

Une famille de gènes était particulièrement touchée : celle codant les interférons, des glycoprotéines de la famille des cytokinines dont la synthèse est en général activée en présence d'un brin d'ADN étranger et qui déclenchent une réaction inflammatoire. Chez la roussette, le nombre de gènes qui codent ces interférons est considérable : son génome compte par exemple 22 variants du gène codant l'interféron-ω, alors que l'humain n'en porte qu'un. Davantage de gènes, davantage d'interférons et donc une riposte plus efficace contre les virus ? Pas exactement. Le panel d'interférons-ω de la roussette pourrait plutôt lui conférer une meilleure sensibilité et lui permettre d'ajuster plus finement sa réponse immunitaire quitte à laisser le virus latent.

UN SYSTÈME IMMUNITAIRE SINGULIER

De fait, c'est aussi ce que suggère l'autre approche, par infection de cellules en culture, qu'une équipe internationale autour de Cara Brooks, de l'université de Californie à Berkeley, a utilisée tout récemment. Les cellules étaient issues de deux espèces, la roussette d'Égypte et le renard volant noir (*Pteropus alecto*). Le renard volant est étrange, car contrairement à la roussette et aux autres mammifères, ses cellules synthétisent en permanence des interférons, ce qui devrait lui causer des inflammations extrêmement nocives. Cara Brooks et ses collègues ont infecté, avec divers virus rendus fluorescents, des >

> cultures cellulaires issues de ces deux espèces de chauves-souris. Ils ont constaté chez chacune de fortes réponses antivirales, mais aussi une diffusion étonnamment rapide des virus de cellule en cellule. Non seulement les cellules semblaient tolérer ces agents pathogènes, mais ces derniers s'y multipliaient particulièrement vite, et donc y mutaient plus vite que d'ordinaire. En d'autres termes, les réponses antivirales ne détruisaient pas les virus, et ces derniers prospéraient dans les cultures.

Les chauves-souris ne contrôlent donc pas leur charge virale. Mais pourquoi ne sont-elles pas malades? Pour y voir plus clair, une équipe internationale autour de David Jebb, de l'institut Max-Planck de Dresde, en Allemagne, s'est penchée sur six génomes d'animaux distribués dans les deux sous-ordres des chiroptères: le grand rhinolophe, la roussette d'Égypte, le phyllostome coloré (*Phyllostomus discolor*), le grand murin (*Myotis myotis*), la pipistrelle de Kuhl (*Pipistrellus kuhlii*) et le molosse commun (*Molossus molossus*).

Les chercheurs ont repéré une dizaine de gènes pour lesquels des variants étaient fortement sélectionnés chez ces animaux. Ces gènes sont impliqués dans l'intégrité de la barrière intestinale, l'activation des macrophages, la régulation du système immunitaire... Autant d'éléments susceptibles de moduler la réponse antivirale. Or, comme vient de le préciser l'équipe de Lin-Fa Wang, de l'université Duke à Singapour, les mutations sélectionnées sont telles que les animaux présentent à la fois des réponses inflammatoires limitées et une tolérance exceptionnelle aux agents pathogènes, éloignant le risque d'emballement immunitaire. Et cela est d'autant plus vrai qu'une dizaine de gènes, présents chez les autres mammifères, avec des fonctions stimulatrices déclenchant l'inflammation, sont perdus chez les chauves-souris.

DES GÈNES PERDUS EN VOL?

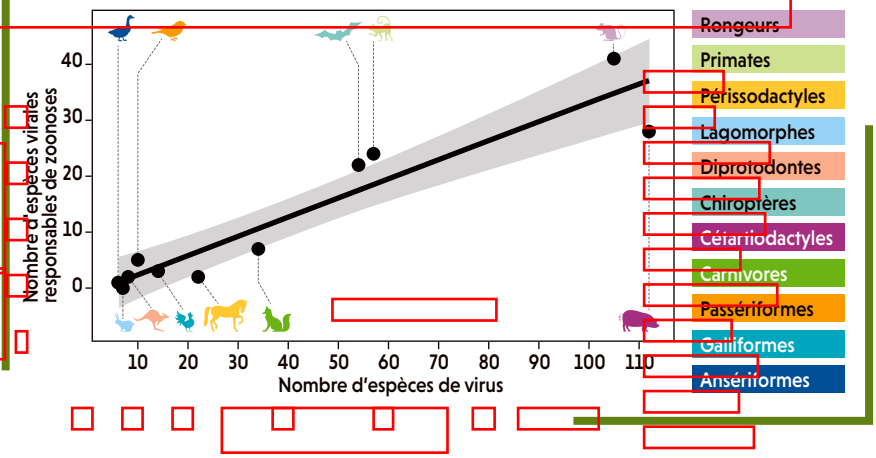
Il y a quatre ans, Lin-Fa Wang a avancé une déroutante explication à l'originalité évolutive d'un tel système immunitaire. L'adaptation au vol en serait la cause... Tout est parti d'une étude partielle d'une dizaine de génomes. Lin-Fa Wang et son équipe constatent que la famille des gènes à motif PYHIN, retrouvée chez tous les mammifères, est absente chez les chauves-souris. Ces pertes ont eu lieu à plusieurs reprises, indépendamment, dans les deux sous-ordres. Les produits de ces gènes sont des détecteurs d'ADN dans le cytoplasme, qu'il soit étranger ou non. Quand ils en repèrent un, ils activent l'inflammation et la voie des interférons.

Or, en vol, les chauves-souris ont un métabolisme élevé qui produit des dérivés réactifs de l'oxygène, lesquels altèrent l'ADN. La perte des gènes à motif PYHIN serait alors une adaptation à un métabolisme élevé, car leur absence atténuerait fortement l'inflammation due à la présence, dans les cellules, des brins d'ADN dégradés à cause de ce métabolisme. Et ce mécanisme fonctionnerait de même pour l'ADN exogène, par exemple d'origine virale. Enfin, Lin-Fa Wang souligne qu'une telle perte de gènes amoindrit les inflammations chroniques dues à l'âge. Un tel contrôle de l'inflammation permettrait de supporter une haute charge virale sans que le système immunitaire ne s'emballe et d'allonger la durée de vie. On comprend pourquoi le milieu médical s'intéresse à ces animaux. Reste, cependant, à déterminer pourquoi nombre de virus qui colonisent les chauves-souris ne les affectent pas...

Ces originalités font-elles des chauves-souris des animaux dangereux? Une étude exhaustive montre qu'elles ne contribuent pas plus que d'autres animaux à sang chaud (mammifères et oiseaux) aux zoonoses (*voir l'encadré ci-dessus*). Donc ne diabolisons pas les chauves-souris! ■

DES ESPÈCES RÉSERVOIRS COMME LES AUTRES

On a longtemps pensé que les rongeurs et les chiroptères se comportaient comme des super-réservoirs. Mais récemment, Nardus Mollentze et Daniel Streicker, de l'université de Glasgow, en Écosse, ont battu cette idée en brèche en réalisant une étude statistique sur les espèces de mammifères et d'oiseaux réservoirs de 415 virus. D'une part, plus les groupes réservoirs abritent d'espèces de virus, plus on compte, parmi ces virus, d'espèces sources de zoonoses *(voir la figure)*. D'autre part, dans chaque classe d'animaux (mammifères et oiseaux), plus un groupe réservoir compte d'espèces, plus il abrite d'espèces virales. Conclusion : si les groupes riches en espèces (chiroptères et rongeurs pour les mammifères, passériformes pour les oiseaux) abritent plus de virus à zoonose, chaque espèce réservoir de ces groupes n'en abrite pas plus que les autres.



BIBLIOGRAPHIE

G. Gob *et al.*, **Complementary regulation of caspase-1 and IL-1ß reveals additional mechanisms of dampened inflammation in bats**, *PNAS*, en ligne le 26 octobre 2020.

A. Banerjee *et al.*, **Novel insights into immune systems of bats**, *Front. Immunol.*, vol. 11, article 26, 2020.

C. E. Brook *et al.*, **Accelerated viral dynamics in bat cell lines, with implications for zoonotic emergence**, *eLife*, vol. 9, article e48401, 2020.

D. Jebb *et al.*, **Six reference-quality genomes reveal evolution of bat adaptations**, *Nature*, vol. 583, pp. 578-584, 2020.

© Pour la Science, d'après N. Mollentze et D. Streicker, Viral zoonotic risk is homogenous among taxonomic orders of mammalian and avian reservoir hosts, PNAS, vol. 117 (17), pp. 9423-9430, 2020

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American

HORS-SÉRIE

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 108 (sept. 20)
réf. DO108

N° 107 (mai 20)
réf. DO107

N° 106 (févr. 20)
réf. DO106

N° 105 (nov. 19)
réf. DO105

N° 104 (juil. 19)
réf. DO104

N° 103 (avr. 19)
réf. DO103

N° 102 (fév. 19)
réf. DO102

N° 101 (nov. 18)
réf. DO101

N° 100 (août 18)
réf. DO100

N° 99 (mai 18)
réf. DO099

N° 98 (févr. 18)
réf. DO098

N° 97 (nov. 17)
réf. DO097

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML**

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

☑ **OUI**, je commande des numéros de **Pour la Science Hors-série**, au tarif unitaire de 10,90 €.

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

1re réf. 0 1 x 10,90 € = 1 0 9 0 €
2e réf. ..... x 10,90 € = ... €
3e réf. ..... x 10,90 € = ... €
4e réf. ..... x 10,90 € = ... €
5e réf. ..... x 10,90 € = ... €
6e réf. ..... x 10,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

Offre valable jusqu'au 31/12/20 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter **boutique.pourlascience.fr**

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Signature obligatoire :

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

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

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

DU CAFÉ OU DU THÉ POUR DÉTOXIFIER

Les fritures ont des composés toxiques que contrecarrent des composés contenus dans le thé, le café ou le chocolat.

L'AUTEUR

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

Les produits frits, notamment, contiennent de l'acroléine, qui est toxique. Mais la théophylline et des composés voisins du thé, du café ou du chocolat réduisent sa concentration.

Pourquoi ne sommes-nous déjà pas morts depuis longtemps, avec tout ce que nous mangeons ? Nos aliments sont pleins de composés «toxiques», et les marchands de cauchemars s'activent pour nous faire croire que nous nous empoisonnons régulièrement quand nous mangeons, notamment parce que l'industrie alimentaire «ultratransformerait» les aliments. Ces discours idéologiques ne résistent pas aux faits, mais il n'en reste pas moins que, tirés du jardin ou de l'usine, les aliments sont des assemblages de composés organiques ou minéraux, dont aucun n'est anodin… Car c'est la dose qui fait le poison, ô Paracelse : tous les composés, même l'eau, sont toxiques à haute dose.

Il y a évidemment des composés plus dangereux que d'autres, et les plus réactifs le sont particulièrement. Par exemple l'acrylamide, qui se forme dans les produits torréfiés, grillés ou frits, à des températures que les cuisiniers pratiquent couramment alors que les chimistes organiciens y regarderaient à deux fois avant de les mettre en œuvre dans leurs laboratoires. Ou encore l'acroléine, ou propèn-2-al (C_3H_4O), qui se forme notamment dans les huiles dont la température dépasse le «point de fumée». Ce composé est classé «Liquide et vapeurs très inflammables», «Mortel par inhalation», «Mortel en cas d'ingestion», «Toxique par contact cutané», «Provoque de graves brûlures de la peau et de graves lésions des yeux», «Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme». À juste titre, car l'acroléine réagit avec les protéines ou l'ADN de l'organisme.

Xiaoyun Jiang et ses collègues de l'université de Nanjing apportent une bonne nouvelle : leur intérêt ayant été éveillé par l'observation de concentrations faibles d'acroléine dans l'urine de fumeurs qui buvaient thé, café ou chocolat, ces chercheurs ont montré que la théophylline de ces boissons réduit la présence d'acroléine (*Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 68(36), pp. 9718-9724, 2020).

La réactivité de l'acroléine rend les études de ce type particulièrement difficiles. Par ailleurs, la question n'était pas seulement de suivre la disparition de l'acroléine, mais aussi d'identifier les produits formés. Les chimistes chinois ont incubé les réactifs, notamment l'acroléine et la théophylline, dans des conditions variées qui reproduisaient pour partie l'environnement des tissus vivants, et ils ont mis en œuvre des méthodes modernes d'analyse : spectrométrie de masse à haute résolution, spectroscopie de résonance magnétique nucléaire, chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse… Les incubations, à des acidités variées, duraient plusieurs heures.

Ils ont ainsi détecté des adduits (composés issus de la réaction) d'acroléine et de théophylline, formés soit d'un résidu d'acroléine et d'un résidu de théophylline, soit de deux résidus d'acroléine pour un résidu de théophylline, après environ dix minutes d'incubation, soit enfin de trois résidus d'acroléine, toujours pour un résidu de théophylline, après plus d'une heure d'incubation.

Après de simples incubations des composés isolés, les chimistes ont recherché les effets avec des boissons faites par infusion de thé vert, de café ou de chocolat : les résultats furent analogues. Il faut d'ailleurs ajouter que la théophylline n'est pas le seul composé protecteur, puisque des acides caféiques ou chlorogéniques du café, ou des flavanols et des procyanidines (des polyphénols) du chocolat épurent également les composés carbonylés, catégorie à laquelle appartient l'acroléine. ■

LA RECETTE

1 Couper des pommes de terre en rondelles de 5 mm d'épaisseur. Les sécher dans un torchon propre, puis les mettre dans de l'huile à 170 °C.
2 Quand on voit des cloques sur les rondelles, les sortir délicatement à l'aide d'une écumoire, puis les plonger dans un second bain très chaud (huile fumante) pour les faire souffler.
3 Déposer les pommes de terre soufflées sur une assiette et les accompagner d'une sauce faite comme suit.
4 Macérer du thé vert dans deux récipients : avec un peu d'eau d'une part, avec de l'huile d'autre part.
5 À l'eau macérée, ajouter une feuille de gélatine préalablement trempée dans de l'eau froide, et chauffer pour la dissoudre.
6 Disperser l'huile macérée au fouet, comme pour monter une mayonnaise.

© Shutterstock.com/ALEXANDRO80

CONCOURS DE NOUVELLES
«Nouvelles Avancées»

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE
Liberté Égalité Fraternité

SOUS LE PATRONAGE DU MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE

ORGANISÉ PAR
ÉCOLE POLYTECHNIQUE — ENSTA — INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS

Demain, la ville...

Infographie : pôle graphique DOC de l'ENSTA ParisTech - octobre 2020. Crédits photos : Pexels-Dylan

Jury présidé par Etienne Ghys, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences (mathématiques) et Anne Szymczak, inspectrice générale de l'éducation, du sport et de la recherche

Date limite d'envoi : 31 janvier 2021

Les nouvelles lauréates seront publiées aux Presses de l'ENSTA

Site : **concours-nouvelles.ensta-paris.fr**
Contact : **concoursdenouvelles@ensta-paris.fr**

ENSTA IP PARIS ALUMNI — AX ÉCOLE POLYTECHNIQUE ALUMNI — POUR LA SCIENCE — Gründ — fondation af Alliances Françaises — FRANCE ÉDUCATION INTERNATIONAL — FONDATION ParisTech — CENTRE DES MONUMENTS NATIONAUX — 75 ans

PICORER

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

P.8

15 °C

Dans un matériau supraconducteur, le courant électrique circule avec une résistance nulle. Ce phénomène apparaît en général pour des températures proches du zéro absolu. Cependant, les physiciens ont mis au point des supraconducteurs qui fonctionnent pour des températures de plus en plus élevées. Le record vient d'être battu et atteint 15 °C… mais à une pression de 2,67 millions d'atmosphères !

P.60

STORMFURY

Ce projet américain des années 1960 consistait à disperser par avion de l'iodure d'argent dans les cyclones pour en perturber la formation. Le projet a été abandonné par manque de résultats.

P.20

« *La science nous apprend la prudence, mais aussi l'audace. Il est dans la nature même de la démarche scientifique d'examiner des hypothèses audacieuses* »

GILLES DOWEK
Chercheur à l'Inria

P.48

4 À 10 %

En 2019, le secteur du numérique aurait été responsable de 4 à 10 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, estimation obtenue en prenant en compte le cycle de vie des équipements.

P. 24

FUZZBALL

D'après un modèle théorique inspiré de la théorie des cordes, les trous noirs seraient des boules denses de cordes microscopiques. Leur surface ne serait pas lisse : on parle de boules duveteuses ou *fuzzballs* en anglais. Ce scénario est l'une des pistes proposées pour résoudre le paradoxe de la conservation de l'information dans les trous noirs.

P.92

INTERFÉRONS

En présence d'ADN étranger, l'organisme active la synthèse de ces molécules, qui déclenchent une réponse inflammatoire. L'humain ne porte qu'un seul variant du gène codant l'interféron-ω. La roussette d'Égypte en présente 22. D'où une réponse immunitaire plus finement ajustée, qui maintiendrait parfois un virus latent.

P.82

LCS35

En 1999, Ronald Rivest a proposé un défi cryptographique, LCS35. Il a estimé, compte tenu de l'évolution des capacités des ordinateurs, qu'il faudrait 35 ans pour en venir à bout. Une équipe du MIT a finalement percé l'énigme en 2019, bien plus tôt que prévu. Le message caché était « !!! Happy Birthday LCS !!! ».

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Décembre 2020 – N° d'édition M0770518-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 249 793 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

Tous les enfants font des rêves mais pour certains c'est vital de les réaliser.

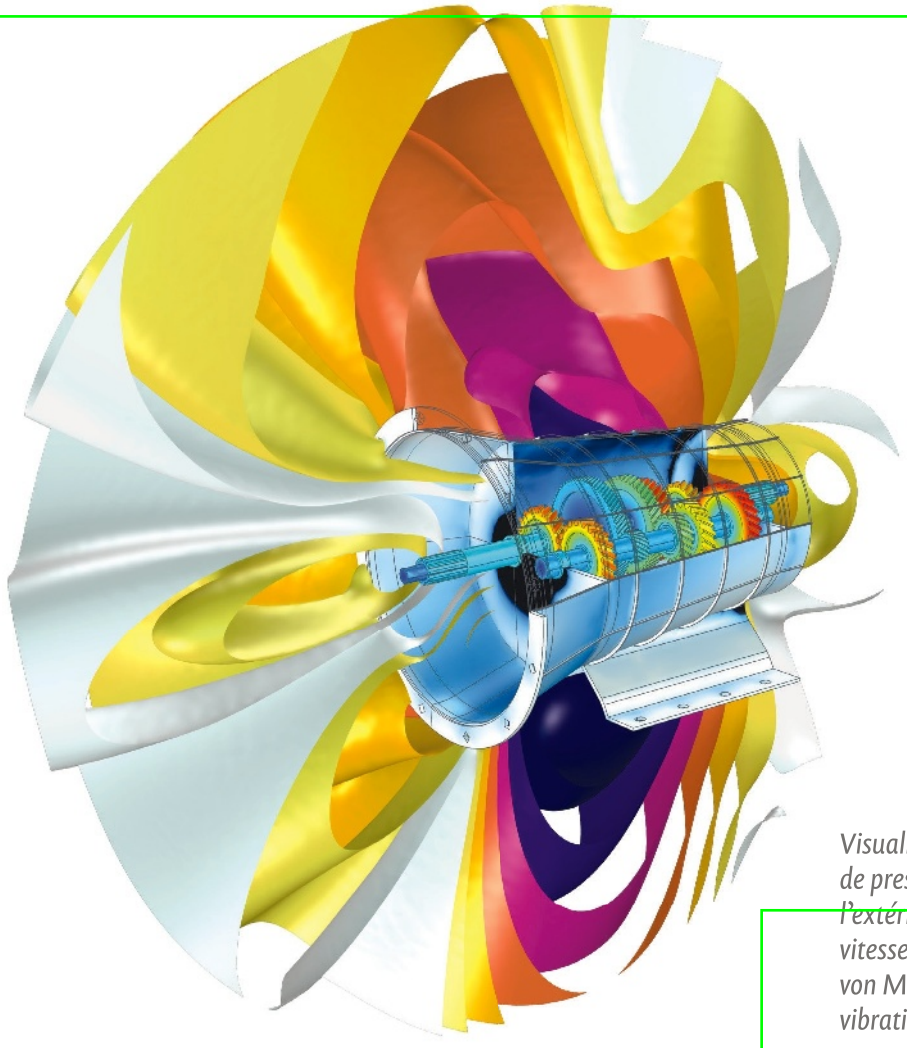
Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves des enfants gravement malades.
Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie, nous avons besoin de vous.

Association Petits Princes

DON en CONFIANCE comitecharte.org

Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation

COMSOL