La Recherche

La Recherche

www.larecherche.fr

MAI 2020 - N° 559 - DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORTCONT 7,40 € - CH 12,40 FS - MAR 65 DH - TUN 9,50 TND - CAN 10,99 $ CAN - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF

M 01108 - 559S - F: 6,40 € - RD

Après le boson de Higgs

À LA DÉCOUVERTE DE NOUVELLES PARTICULES

4 muons (lignes bleues) lors d'une collision de particules dans le détecteur Atlas au Cern.

CORONAVIRUS

5 PISTES DE TRAITEMENT ACTUELLEMENT TESTÉES

RÉPARER L'AUDITION

par Christine Petit, directrice de l'Institut de l'audition

URGENCE

VENEZ EN AIDE AUX VICTIMES

CORONAVIRUS

SECOURS POPULAIRE FRANÇAIS

Face au Coronavirus, et pour maintenir son activité dans le respect des règles de sécurité recommandées par le Ministère de la santé, le Secours populaire en appelle à la mobilisation de tous et aux dons financiers.

Faites un don sur secourspopulaire.fr

DON en CONFIANCE comitecharte.org

URGENCE

L'édito par Dominique Leglu
Directrice de la rédaction

Signatures inconnues

Le Cern, dont l'accélérateur LHC (pour Large Hadron Collider) court sous la frontière franco-suisse, non loin de Genève, a lui aussi dû mettre ces derniers temps ses travaux en sommeil pour cause de coronavirus, rappelle, aux fidèles de *La Recherche,* Ursula Bassler, présidente du Conseil de cet immense laboratoire européen (lire p. 44). Ce qui n'empêche sûrement pas d'espérer un sursaut de vitalité pour ce regroupement de milliers de scientifiques autour de la meilleure machine au monde dans sa catégorie. Dans les années à venir, des expériences toujours plus sophistiquées vont être conçues, faisant s'entrechoquer des particules de matière. In fine, pourrait bien en émerger une nouvelle physique! Avec des perspectives enthousiasmantes sur la compréhension fondamentale de notre monde, ce qu'explicite le dossier de ce mois-ci, piloté par le journaliste spécialisé Sylvain Guilbaud.

IL FAUT L'AVOUER, depuis le triomphe, à l'été 2012, de la découverte enfin confirmée du boson de Higgs, cette particule si spéciale qui fait surgir (en simplifiant exagérément) la masse chez ses congénères et elle-même, les physiciens des particules ont de quoi piaffer. Car ils savent bien, eux qui auscultent l'infiniment petit, tout comme leurs homologues qui se tournent vers l'infiniment grand, que l'édifice actuel, qui va des quarks et leptons aux atomes (p. 38), ne suffit pas. Comment expliquer la matière noire? Pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu de l'Univers? Il faut aller au-delà du bel ordonnancement des particules, que l'on nomme depuis des années le modèle « standard » (p. 40). Si jadis, en sa lointaine origine (1), ce mot anglais a pu signifier « stable, fixe », on comprend qu'aujourd'hui se concocte tout l'inverse.

SANS CASSER leur beau joujou qui se révèle insuffisant, les physiciens veulent renverser la table et affronter l'inconnu. Il est passionnant de voir que tous sont mis à contribution, aussi bien les expérimentateurs que les théoriciens (p. 48). Optimiste, on pourrait même dire qu'ils vont jouir là d'un bain de jouvence. Comme un retour aux sources de la physique, dont la construction exige des modèles, mais aussi des expériences conçues pour les… démolir ou les consolider. Beaucoup de collisions en perspective, avec la traque de signatures de particules inconnues. Pour le plus grand bonheur des physiciens et des physiciennes!

(1) « Standard », qui signifie « norme », vient de l'ancien français *estandart,* issu de l'ancien bas francique *standhard* qui a pour sens « stable, fixe ».

BERNARD MARTINEZ

SOPHIA PUBLICATIONS: 8, rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél.: 0170981919 • **e-mail rédaction:** courrier@larecherche.fr • Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle: initiale du prénom suivi du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement: 0155567056 • **Adresse:** *La Recherche,* 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex. **Tél.:** 0155567115. • **ABONNEMENTS: Tarif France:** 1 an 10 nos + 1 n° double 67 euros. 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries 89 euros. **Tarif international:** nous contacter. **E-mail:** abo.recherche@groupe-gli.com • **Suisse:** Edigroup. Tél.: 022860 84 01 • **Belgique:** Edigroup. Tél.: 070233304 • **Achat de revues et d'écrins *La Recherche*** – 8 rue d'Aboukir 75002 Paris. **Tél.:** 0170981924.

La Recherche est publiée par Sophia Publications • **Président-directeur général et directeur de la publication:** Claude Perdriel • **Directeur général:** Philippe Menat • **Directeur éditorial:** Maurice Szafran • **Directeur éditorial adjoint:** Guillaume Malaurie • **Directeur délégué:** Jean-Claude Rossignol • **Directrice de la rédaction:** Dominique Leglu • **Rédacteur en chef:** Philippe Pajot • **Rédacteur en chef adjoint:** Vincent Glavieux • **Conception graphique, couverture:** Dominique Pasquet • **Assistante:** Gabrielle Monrose (19 06) • **Chefs de rubrique:** Hervé Cabibbo (19 30), Gautier Cariou (19 31), Mathias Germain (19 33), Sylvain Guilbaud (19 38), Bérénice Robert (19 34) • **Directrice artistique:** Maryvonne Marconville (19 28) • **Service photo:** Claire Balladur (19 41) • **Première secrétaire de rédaction:** Anaëlle Bruyand (19 35) • **Ont collaboré à ce numéro:** Grégoire Ader, Antoine Cappelle, Valentin Faivre, Fabien Lehalle, Victoria Milhomme • **Fabrication:** Christophe Perrusson (19 10), Thibault Quéré (19 21) • **Activités numériques:** Bertrand Clare (19 08) • **Communication:** Joëlle Hézard 0158650999 • **Directeur des ventes et promotion:** Valéry-Sébastien Sourieau (19 11) • **Vente messageries VIP-diffusion:** Frédéric Vinot • Numéro vert 0800 51 49 74 • **Responsable gestion abonnements:** Isabelle Parez (19 12) • **Responsable du marketing direct:** Linda Pain (19 14) • **Responsable administratif et financier:** Nathalie Tréhin (19 16) • **Comptabilité:** Teddy Merle (19 15) • **Diffusion librairies :** Pollen DIF'POP'. Tél.: 0143620807 Fax: 0172718451 • **Régie publicitaire:** MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél.: 0144889770. Fax: 0144889779 • e-mail: pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directeur général:** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial:** Jean-Benoît Robert (97 78) • **Directeur du pôle Sciences:** Sylvain Mortreuil (97 75) • **Partenariats:** KarineGrossman(89 08) • **Studio/Maquette/Techniques:** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie:** Elcograf Spa (Vérone - Italie). Dépôt légal à parution. Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél.: 0144074770. Fax: 0146346719). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire: 0924 K 85863. ISSN 0029-5671.

CRÉDITS: FONDS: CERN/ATLAS EXPERIMENT – PORTRAIT: WILLIAM BEAUCARDET

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées
PEFC
PEFC/18-32-03
www.pefc-france.org

acpm OJD DIFFUSION

Origine du papier: Allemagne - Taux de fibres recyclées: 0 % - Eutrophisation. PTot = 0,016 kg/tonne de papier. Ce magazine est imprimé chez Elcograf Spa (Vérone - Italie), certifié PEFC.

Entretien avec

Christine Petit

La France s'est enfin dotée d'un centre de recherche en neurosciences dédié aux troubles auditifs. À Paris, l'Institut de l'audition, dirigé par Christine Petit, conduit des travaux de recherche fondamentale allant de l'oreille interne au cortex auditif. Il a vocation à développer des traitements innovants, comme la thérapie génique.

“Proposer enfin des solutions thérapeutiques pour traiter la surdité”

Une nouvelle façade orne la rue de Charenton, à Paris : une mosaïque de vitres, telles des cellules d'un tissu biologique, reflète les vibrations lumineuses et sonores de cette voie qui longe l'Opéra Bastille. Sur plus de 4 000 m², le nouvel Institut de l'audition met aujourd'hui au grand jour un handicap dont on parle trop peu : les défaillances auditives. Porté par l'Institut Pasteur et la Fondation pour l'audition, ce projet offre aussi un espoir : comprendre les mécanismes du traitement des signaux sonores et, surtout, découvrir des thérapies qui feront que la surdité ne sera plus une fatalité. Cette ambition est poursuivie de longue date par Christine Petit, professeure au Collège de France et à l'Institut Pasteur. C'est en explorant la génétique de la surdité chez l'homme qu'elle découvre plusieurs des mécanismes impliqués dans le traitement des sons par l'oreille interne. Elle révèle ainsi, à l'échelle moléculaire, la biologie unique des cellules sensorielles auditives, les cellules ciliées, qui transforment le signal sonore en signal nerveux. C'est elle qui a pris la tête de l'institut.

Éminente chercheuse dans le domaine des troubles auditifs, Christine Petit a reçu, en 2018, le prix Kavli en neurosciences.

WILLIAM BEAUCARDET

La Recherche Neuf équipes de recherche sont installées dans l'Institut de l'audition, qui a été inauguré par le Premier ministre le 27 février. Quel est leur champ d'investigation ?

Christine Petit L'institut couvre l'ensemble du système neurosensoriel auditif, qui s'étend de l'organe sensoriel auditif, la cochlée, au cortex auditif primaire et aux aires corticales associées. Il n'englobe ni l'oreille externe, ni l'oreille moyenne. Il regroupe des chercheurs de différentes disciplines scientifiques : biophysique, audiologie, neurophysiologie, neuroscience computationnelle, génétique et génomique, biologie cellulaire et des disciplines médicales (ORL, audioprothèses…). Les responsables de ces équipes ont été sélectionnés par un conseil scientifique international composé des meilleurs experts du domaine.

Quels sont les objectifs de l'institut ?

L'un des buts est de faire progresser la connaissance du traitement des sons par la cochlée, et d'élucider les principes du traitement de l'information sonore qui sous-tendent la perception et la cognition auditives. Ce champ de recherche est en •••

SES DATES

1948 Christine Petit naît à Laignes (Côte-d'Or).
1974 Elle obtient un doctorat en médecine, à Paris.
1974 Elle entre à l'Institut Pasteur.
1982 Elle passe son doctorat en biochimie et en génétique.
1985 Elle élucide l'origine des inversions de sexe (masculinité XX et féminité XY).
1991 Elle identifie sur le chromosome X le premier gène impliqué dans une atteinte de l'odorat, le syndrome de Kallmann.
1995 Elle caractérise le premier gène responsable d'un syndrome associant une surdité congénitale et une perte de la vision, le syndrome de Usher.
2002 Elle est nommée professeure au Collège de France dans la chaire de génétique et physiologie cellulaire.
2018 Elle reçoit le prix Kavli en neurosciences.

••• pleine expansion ! Avec l'élaboration de nouveaux outils expérimentaux comme ceux de l'optogénétique (*), permettant l'exploration de l'activité neuronale, ou d'analyse de résultats, il s'invente et se recompose rapidement. D'où le choix de l'interdisciplinarité, qui est une source de créativité.

Recherchez-vous également des thérapies ?

Oui, la recherche translationnelle fait partie de nos objectifs principaux. Aujourd'hui, seules des prothèses sont proposées aux malentendants. Grâce aux connaissances acquises sur la cochlée au cours des deux dernières décennies, la recherche de thérapies curatives des atteintes auditives portant sur cet organe est devenue un objectif de recherche réaliste, qui s'étendra au système auditif central à la faveur des connaissances qui seront acquises sur ce dernier, principalement sur sa plasticité. Cette plasticité est en effet la condition du succès de toute thérapie cochléaire : elle reconfigure les réseaux neuronaux en modifiant leurs synapses, de sorte que leur activité s'adapte à l'information sensorielle qui leur parvient de la cochlée « restaurée ». Prédire la récupération fonctionnelle qui suivra une thérapie cochléaire, solliciter cette plasticité de manière optimale, lors de toute approche thérapeutique ou rééducation auditive, tout cela fait partie des bénéfices attendus.

L'institut traitera-t-il des patients ?

Non, nous sommes un centre de recherche, et les essais cliniques se feront dans les services hospitaliers spécialisés, en collaboration avec nos équipes. Cela dit, des volontaires viendront à l'institut, au Centre de recherche et d'innovation en audiologie humaine (Ceriah) que dirige le professeur Paul Avan, biophysicien et médecin. Mais ce n'est pas un centre de consultation : le Ceriah élabore des protocoles d'exploration de l'audition et les valide, chez des personnes dont l'audition est normale et chez des personnes malentendantes, par des tests perceptifs et des mesures électrophysiologiques souvent ludiques et jamais douloureux. Sa force réside dans l'acoustique spécifique de ses locaux et dans sa logistique. Nous avons ainsi la capacité d'explorer des aspects multisensoriels, de construire des appareils de mesure audiologique et des protocoles normalisés, utiles au diagnostic, au contrôle des thérapies, à la mesure des nuisances sonores et à une meilleure compréhension de composantes de la perception et de la cognition auditives. Le Ceriah sera la plateforme clé en main qui traduira la recherche fondamentale de l'institut en applications pratiques : innovations thérapeutiques, médecine personnalisée…

L'institut est proche de la place de la Bastille. A-t-il été difficile de bâtir de nouveaux laboratoires dans le centre de Paris ?

Il est vrai que nous avons rencontré quelques difficultés techniques. L'étude des cellules sensorielles auditives nécessite des travaux d'isolement par rapport aux vibrations environnantes, celles du métro en particulier. En effet, l'antenne de réception au son de ces cellules, la touffe ciliaire, est sensible à des déplacements de l'ordre du nanomètre… Autre contrainte : l'animation du quartier a nécessité l'isolation phonique de certains laboratoires pour un contrôle fin des stimulations acoustiques. Nous avons bénéficié pour cela de l'expérience et des solutions mises en place dans le campus historique de l'Institut Pasteur, dans le XV^{e} arrondissement de Paris, qui a connu des contraintes analogues pour l'installation de certaines technologies de pointe, le microscope Titan Krios par exemple *[un instrument qui permet d'observer les molécules des cellules à l'échelle de l'atome, NDLR]*.

Mais un tel emplacement ne constitue-t-il pas aussi un avantage ?

En effet, s'établir dans un quartier commerçant, vivant et jeune est particulièrement attractif. La proximité de l'Institut de la vision (à 100 m) et de

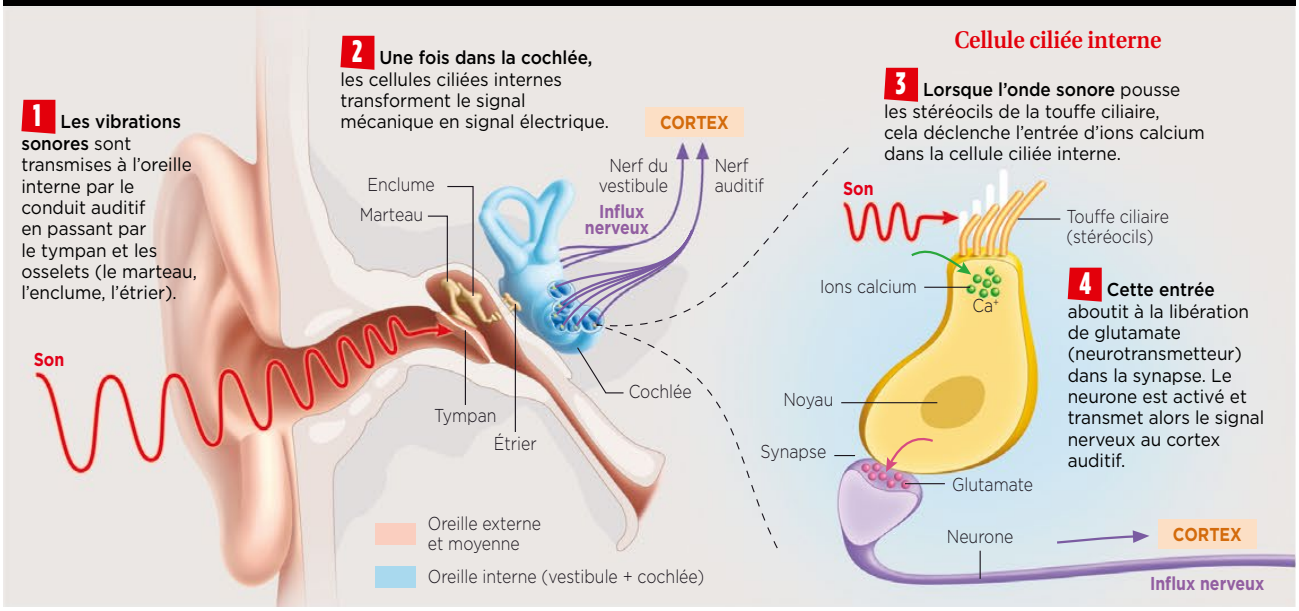
500 MILLIONS

DE PERSONNES sont malentendantes à travers le monde, dont 6 millions en France. Leur nombre pourrait atteindre 900 millions en 2050.
Source : OMS.

ALERTE AU BRUIT

Le bruit est aujourd'hui reconnu comme l'agent agresseur principal du système auditif, à tout âge. Selon l'OMS, 1,1 milliard de jeunes entre 16 et 23 ans sont dits « à risque » d'être atteints de pertes auditives en raison d'une surexposition sonore, principalement dans le cadre récréatif (qui n'est pas soumis au même contrôle des niveaux sonores que celui existant dans le cadre professionnel dans les pays développés). S'y ajoute l'écoute musicale prolongée et à forte intensité (utilisation du casque et des baladeurs audionumériques). En outre, les nuisances sonores ne cessent de croître dans les zones urbaines, où se concentre 56 % de la population mondiale (68 % en 2050, avec des mégapoles très bruyantes, particulièrement dans les pays en voie de développement). M. G.

Fig. 1 La transformation du son en signal nerveux



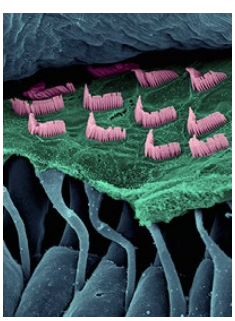
l'Institut du cerveau (à 1 km, dans le XIII[e] arrondissement) fait sens sur le plan scientifique comme médical et porte l'espoir de collaborations fructueuses. Se regrouper avec des collègues de l'Inserm, organisme auquel est affilié l'Institut de l'audition, et d'autres du CNRS, pour créer ensemble une dynamique de recherche tournée vers de nouveaux objectifs, c'est une formidable opportunité.

Pourquoi créer un tel institut maintenant ?

D'abord parce que les avancées de la connaissance fondamentale permettent aujourd'hui la recherche d'un traitement curatif de la cochlée. S'ajoute à cela la prise de conscience à l'échelle planétaire de l'enjeu de santé publique que représentent les atteintes de l'audition. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime à près de 500 millions la population de malentendants à travers le monde et en prévoit 900 millions à l'horizon 2050. En France, leur nombre est aujourd'hui évalué à 6 millions.

Quelles sont les autres raisons ?

On sait depuis peu que la perte de l'audition chez l'adulte est un facteur de risque majeur de la survenue d'une démence. Et la surdité neurosensorielle liée à l'âge – la presbyacousie – ne cesse de croître en raison du vieillissement de la population. Par ailleurs, il était temps d'ouvrir un tel institut car les neurosciences de l'audition accusaient un retard considérable par rapport à celles de la vision, avec pour corollaire un retard dans le domaine de l'innovation thérapeutique. Celui-ci a été masqué par le relatif succès des prothèses, comme les prothèses auditives conventionnelles et les implants cochléaires, qui compensent une partie seulement du handicap.



▲ *L'oreille interne vue en microscopie électronique à balayage. En rose, les cellules sensorielles auditives, avec leurs touffes ciliaires.*

(*) L'optogénétique est une méthode qui permet de rendre des neurones sensibles à la lumière et ainsi de stimuler spécifiquement un type cellulaire en laissant les autres intacts.

À quoi était dû ce retard ?

Ce retard s'explique par la très grande difficulté à laquelle fait face toute étude de la cochlée. D'une part, elle est difficile d'accès : enchâssée dans un os, l'os temporal, elle ne peut pas être observée directement. D'autre part, chacun de ses types cellulaires comporte très peu de cellules. Ainsi les cellules ciliées internes, qui sont les seules cellules sensorielles à envoyer un message sonore codé au cerveau, sont au nombre de 3 500 dans une cochlée, tandis que la rétine est directement observable et abrite plus de 100 millions de cellules sensorielles, les photorécepteurs (bâtonnets et cônes). S'y ajoute le fait que la conversion du signal sensoriel en un signal électrique (transduction auditive) repose sur une machinerie composée de molécules qui, dans les cellules ciliées, sont très faiblement exprimées. Ces molécules d'importance étant en petit nombre, cela a conduit à un échec des approches de biochimie et de biologie moléculaire.

N'est-il pas possible de cultiver des cellules ciliées afin d'identifier ces molécules ?

Il existe quelques lignées cellulaires qui expriment certaines protéines préférentiellement synthétisées par les cellules ciliées. Toutefois, ces cellules n'ont aucune des caractéristiques morphologiques et physiologiques des cellules ciliées, ni touffe ciliaire ni synapse. De ce fait, leur intérêt est limité. Aujourd'hui, les efforts se concentrent sur la production de cellules ciliées à partir d'organoïdes (*) cochléaires dérivées de cellules souches pluripotentes, cultivées dans des gels tridimensionnels. La démarche paraît prometteuse. •••

INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT - INSTITUT PASTEUR/UNITÉ GÉNÉTIQUE ET PHYSIOLOGIE DE L'AUDITION - COLORISATION JEAN-MARC PANAUD

“Recevoir et informer les associations de patients est l’une des missions de l’institut”

••• Qu’est-ce qui a fait progresser la recherche ?
C’est la génétique ! Elle nous a permis de nous affranchir des difficultés qui faisaient obstacle à la connaissance du fonctionnement cochléaire à l’échelle moléculaire. Aussitôt le premier gène responsable de surdité neurosensorielle identifié chez l’homme, en 1995, il a été possible de découvrir les fonctions des protéines codées par ces gènes de surdité, par l’obtention et l’intégration d’un ensemble de données complémentaires. Ensuite, les modèles murins de surdités humaines ont permis d’identifier, pour une même protéine, son rôle embryonnaire, postnatal ou associé à des conditions de stress (stress sonore en particulier). C’est en cherchant à regrouper les protéines codées par ces gènes au sein de complexes ou de réseaux protéiques que les mécanismes moléculaires qui sous-tendent diverses fonctions cochléaires ont pu être mis en évidence.

Est-ce afin de découvrir ces réseaux protéiques que vous vous êtes intéressée au syndrome de Usher, un handicap héréditaire associant à la surdité une atteinte de la vision ?
Oui, en étudiant la forme la plus sévère (Usher de type I), nous avons découvert que des gènes responsables de ce syndrome codent des protéines qui composent la machinerie de transduction auditive. Elles composent des liens entre les stéréocils qui constituent la touffe ciliaire (Fig. 1). Ces protéines assurent ainsi son indispensable cohésion lors de sa formation. Nous nous sommes ensuite intéressés aux gènes responsables du syndrome de Usher de type II. Et nous avons découvert qu’eux aussi codent des protéines qui forment des liens dans la touffe ciliaire, mais d’un autre type. Ces liens sont en effet essentiels pour remettre en état opérationnel la touffe ciliaire après qu’elle a été soumise à une vibration.

Combien de gènes responsables de surdité ont été identifiés ?
Aujourd’hui, on connaît un peu plus de 130 gènes responsables de surdités isolées, et il y en a sans doute encore d’autres. En progressant dans l’identification du rôle de protéines codées par des gènes responsables de surdités isolées, nous avons réussi à identifier certaines caractéristiques physiologiques des atteintes auditives correspondantes. Elles nous ont guidés pour rechercher d’autres surdités isolées qui présentaient des caractéristiques semblables. Ainsi, de proche en proche, on reconstitue des complexes ou réseaux d’interactions moléculaires au niveau de la cochlée qui sous-tendent une fonction donnée. Je pourrais citer aussi la découverte de composants moléculaires quasi spécifiques de la synapse des cellules ciliées, qui rendent comptent de l’extrême précision temporelle de la libération de son neurotransmetteur, le glutamate.

Toutes les protéines impliquées dans le mécanisme de transduction ont-elles été mises en évidence ?
Plusieurs dizaines de protéines différentes sont vraisemblablement impliquées dans la machinerie de transduction auditive. Une dizaine d’entre elles ont été découvertes. Toutes l’ont été comme produits de gènes responsables de surdités.

Quelles sont les pistes thérapeutiques offertes par ces découvertes ?
On peut enfin s’engager dans le développement d’authentiques thérapies de la cochlée ! Trois grands types d’approche thérapeutique sont désormais possibles : la thérapie génique, principalement destinée aux atteintes héréditaires monogéniques – elles relèvent chacune de l’atteinte d’un seul gène –, le développement de médicaments candidats et la thérapie cellulaire.

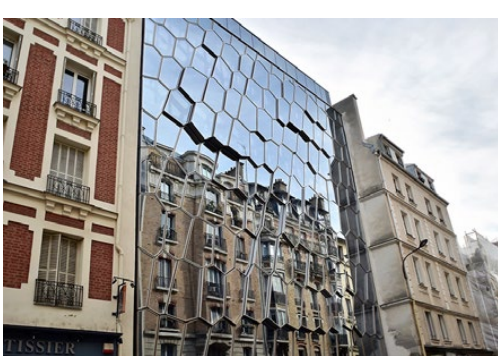
En 2019, un essai de thérapie génique chez l’animal a donné des résultats encourageants. Peut-on espérer des essais chez l’homme ?
C’est l’un de nos objectifs ! L’année dernière, l’équipe du docteur Saaïd Safieddine, dans mon laboratoire, est parvenue à restaurer l’audition de souris adultes atteintes d’une surdité congénitale. Elles étaient affectées d’une surdité neurosensorielle de la forme DFNB9, représentant 2 à 8 % des surdités héréditaires congénitales sévères à profondes chez l’homme. Les individus atteints sont porteurs de mutations dans le gène Otof qui code l’otoferline, protéine indispensable à la libération du neurotransmetteur dans la synapse par les cellules

130

GÈNES RESPONSABLES de surdité isolée sont aujourd’hui connus, mais il en existe sans doute encore d’autres.

L’INSTITUT DE L’AUDTION EN CHIFFRES

9 équipes de recherche
130 personnes, dont 110 scientifiques
50 millions d’euros de budget apportés par la Fondation pour l’audition (Fondation Bettencourt-Schueller).

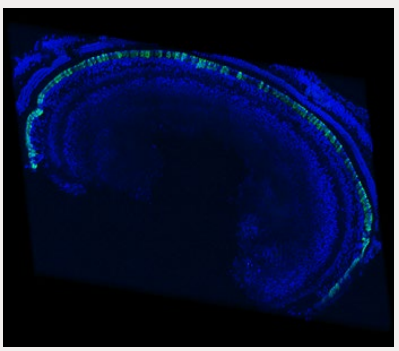


Installé au centre de la capitale, l’Institut de l’audition pourra bénéficier de synergies avec des équipes scientifiques voisines.

FRANCK CASTEL

APPORTER LE GÈNE MANQUANT À L'AIDE DE DEUX VIRUS

C'est une belle première ! Des biologistes, notamment l'équipe de Saaïd Safieddine à l'Institut Pasteur (maintenant à l'Institut de l'audition), sont parvenus à insérer un gène manquant à des souris adultes sourdes (1). Ces animaux présentaient une surdité de la forme DFNB9, un trouble auditif représentant 2 à 8 % des surdités héréditaires sévères à profondes chez l'homme. Les individus atteints sont dépourvus du gène Otof codant une protéine indispensable à la transmission du signal sonore au niveau des synapses des cellules sensorielles de l'oreille interne. Pour réinsérer le gène manquant, les scientifiques ont utilisé comme vecteurs des adénovirus associés (AAV), non pathogènes. Si cette technique est déjà éprouvée dans des maladies comme la drépanocytose, les biologistes ont néanmoins relevé un défi de taille : la séquence génétique qui correspond au gène Otof est trop longue par rapport au diamètre des adénovirus. Le gène contient environ 6 kilobases, alors que les AAV ne peuvent transporter que des séquences de taille inférieure ou égale à 4,7 kilobases. L'équipe a résolu le problème en scindant le gène en deux, et en le répartissant dans deux vecteurs viraux. Après les avoir injectés dans la cochlée, ces adénovirus adoptent une configuration « tête à queue », ce qui déclenche un processus naturel de recombinaison entre les deux morceaux de gène. Cette technique génétique a fait l'objet d'un dépôt de brevet par le CNRS, l'Inserm et l'Institut Pasteur, et un projet d'essai clinique vient d'être déposé. M. G.



▲ *Dans cette cochlée d'une souris sourde, la production d'otoferline (en vert), protéine nécessaire à l'audition, a pu être rétablie.*

(1) O. Akil *et al., PNAS, 116,* 4496, 2019.

sensorielles de la cochlée (lire l'encadré ci-dessus). D'où l'idée d'apporter le gène Otof à ces cellules par un vecteur viral. Aujourd'hui, nous développons des tests précliniques dans la perspective d'un essai thérapeutique qui évaluerait cette approche.

La thérapie génique pourrait-elle avoir des applications dans le domaine des pertes auditives liées à l'âge ?

La presbyacousie relève de causes qui sont à la fois génétiques et environnementales. Les causes génétiques peuvent être des variants génomiques associés à plusieurs gènes dont chacun contribue faiblement à l'atteinte auditive ou, à l'inverse, il peut s'agir de l'altération d'un seul gène dont l'effet sur la fonction auditive est majeur. Dans le but d'explorer la possibilité de traiter la presbyacousie par thérapie génique, notre laboratoire s'attache à caractériser les bases génétiques des formes de presbyacousie sévère, à la recherche de formes monogéniques qui pourraient bénéficier de cette approche thérapeutique.

Concernant la piste médicamenteuse, quelle est votre stratégie ?

Nos efforts portent sur l'établissement de conditions qui permettent d'optimiser les tests de médicaments candidats. Nous pensons que beaucoup d'essais thérapeutiques portant sur des molécules candidates échouent faute d'une bonne catégorisation des patients intégrés dans ces études. La surdité héréditaire précoce est assez bien explorée mais, pour les autres formes de surdité, les données dont on dispose sont rudimentaires. Il est important de parvenir à une description fine de ces surdités. Sans cela, les tests de médicaments candidats resteront vraisemblablement infructueux, compte tenu de l'hétérogénéité de la pathogénie des surdités. C'est au Ceriah que seront développées les nécessaires innovations méthodologiques et instrumentales pour y parvenir.

Vous avez évoqué la piste de la thérapie cellulaire. Pensez-vous qu'il serait possible de régénérer la cochlée ?

Les cellules ciliées ne se régénèrent pas spontanément chez les mammifères. En revanche, chez les vertébrés non-mammifères, les oiseaux par exemple, elles en ont la capacité. Plusieurs groupes de recherche s'attachent à définir les voies de signalisation impliquées dans cette régénération chez le poulet, ou bien au niveau de la ligne latérale du poisson zèbre, dans l'objectif de restaurer ultérieurement cette fonction chez l'homme.

Quel rôle jouent les associations de patients dans l'institut ?

Recevoir et informer les associations de patients est une des missions de l'institut. L'acoustique des espaces où ils seront amenés à se déplacer est très finement contrôlée. À cet effet, l'amphithéâtre de l'institut est équipé d'une boucle d'induction magnétique qui permet aux malentendants porteurs de prothèses auditives de suivre au mieux les conférences, même en présence de bruit ambiant. Nous sommes particulièrement attachés aux rencontres avec les patients. Voilà pourquoi une journée particulière d'inauguration de l'Institut de l'audition leur a été réservée. ■

Propos recueillis par Mathias Germain

(*) **Un organoïde** est une structure multicellulaire tridimensionnelle qui reproduit in vitro la micro-anatomie d'un organe.

INSTITUT PASTEUR

COLAS

en association avec **La Recherche**

Les Rencontres Scientifiques Colas

Conférence-débat

le jeudi 28 mai 2020
de 18h00 à 19h30

*animée par **Eli Flory***
animatrice d'événements scientifiques

Biomimétisme

avec

Laura Magro,

Directrice Adjointe du Ceebios, le Centre d'études et d'expertises en biomimétisme.
« Ceebios accélère la transition sociétale par le biomimétisme en fédérant un réseau d'acteurs experts et en développant les ressources indispensables à l'appropriation de la démarche par les secteurs académiques, institutionnels et privés. »
Source ceebios.com

et

Emmanuel Roy,

Co-fondateur d'Eden Microfluidics, start-up DeepTech créée en 2017.
Grand lauréat du concours i-Lab 2019 pour son projet Eden Cleantech, procédé microtechnologique et biomimétique de décontamination des eaux.

Quel point commun entre le martin-pêcheur, la peau du gekko, un essaim d'abeilles, une termitière, un moustique, à part celui d'appartenir au règne animal ? Chacun a inspiré à des scientifiques, des ingénieurs et des entrepreneurs une façon de faire, une technologie, une architecture qui a changé la vie des humains. Vous manquez d'inspiration ? Un problème reste sans solution ? Observez la nature, elle a sûrement trouvé depuis quelques milliers d'années déjà ce que vous cherchez en vain. Théorisée en 1998 par la scientifique américaine Janine Benyus, le biomimétisme réconcilie technosphère et biosphère, unies par une vision holistique de l'Univers.

Inscription obligatoire avant le 20 mai 2020 :
kgrossman@mediaobs.com
Nombre de places limitées

Lieu : Campus Scientifique et Technique Colas
4, rue Jean Mermoz
78114 Magny-les-Hameaux

Une navette partira à 16h30 précises du Siège de Colas
1, rue du Colonel Pierre Avia – 75 015 Paris

sommaire/mai 2020 - n° 559

3 **ÉDITO**

4 **ENTRETIEN AVEC CHRISTINE PETIT**
« Proposer enfin des solutions thérapeutiques pour traiter la surdité »

12 **COURRIER**

ACTUALITÉS

14 **Spécial Covid-19** Pourquoi le coronavirus rend-il malade ?

18 Une course mondiale aux traitements

22 Les tests de dépistage, clés du déconfinement

25 Témoignages. Les chercheurs à l'heure du confinement

26 **Paléoanthropologie** Les origines de Neandertal explorées à partir d'une dent

27 **Géologie** Au temps où il faisait 12 °C en Antarctique

28 **Neurosciences** Cet algorithme qui peut lire les émotions des souris

28 **Neurobiologie** Plus faim ? C'est (aussi) dans votre tête

29 **Biologie** Écologie de la langue

30 **Astronomie** L'origine d'Arrokoth expliquée par sa forme bilobée

31 **LA CHRONIQUE Transition énergétique** Les ressources de la démocratie *Marie Dégremont*

32 **Astrophysique** Hubble détecte un possible trou noir

32 **Chimie** Un gel capable de piéger les « produits chimiques éternels »

33 **Mathématiques** La théorie ergodique sous les projecteurs

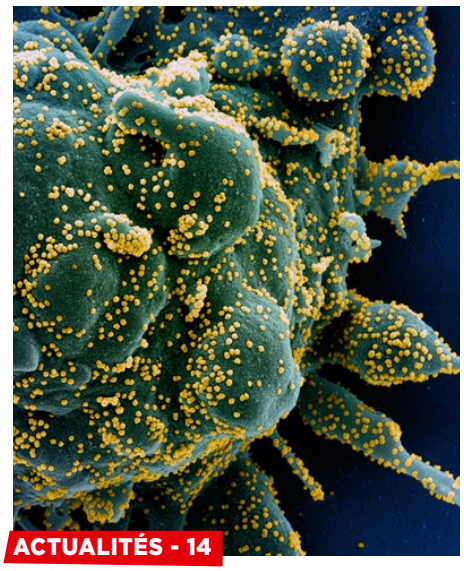
34 **START-UP** *Pierre Vandeginste*

35 **LA CHRONIQUE Numérique** Le vote électronique, progrès ou danger ? *Gérard Berry*

DOSSIER

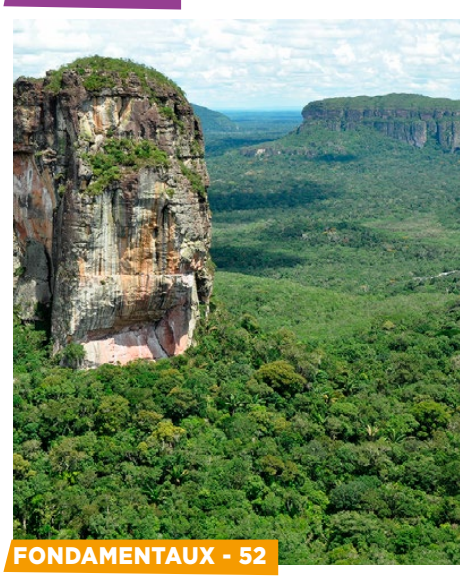
PHYSIQUE DES PARTICULES : APRÈS LE BOSON DE HIGGS

38 Les territoires connus de la physique des particules



ACTUALITÉS - 14

DOSSIER - 36



FONDAMENTAUX - 52

40 Au-delà du modèle standard *Cédric Delaunay*

44 « Le boson de Higgs, portail vers une nouvelle physique » *Entretien avec Ursula Bassler*

48 Un chemin entre théorie et expérience *Sylvain Guilbaud*

FONDAMENTAUX

52 **ARCHÉOLOGIE** Le patrimoine archéologique de l'Amazonie en péril *Stéphen Rostain*

58 **TECHNOLOGIE** Les rayons X percent les secrets des puces électroniques *Stéphanie Anceau*

62 **POLITIQUE SCIENTIFIQUE** « Il faut mieux reconnaître les chercheurs pratiquant la science ouverte » *Entretien avec Marin Dacos*

66 **LA CHRONIQUE Neurosciences** Quand la machine du sommeil se grippe *Adrien Peyrache*

67 **MATÉRIAUX** L'étonnant pouvoir sculptant de la glace *Martin Clavey*

70 **HISTOIRE DES SCIENCES** Une lentille au secours des marins *Marie-Christine de La Souchère*

74 **LA CHRONIQUE Mathématiques** Cambriolages et taches de léopards *Roger Mansuy*

LIVRES

76 **LA SÉLECTION DU MOIS**

AGENDA - JEUX

81 **JEUX** *Tangente*

82 **LA CHRONIQUE Éthique** La surveillance de la pandémie demande une éthique de responsabilité *Jean-Gabriel Ganascia*

Ce numéro comporte un encart abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France.

NIAID - CERN/MAXIMILIEN BRICE - STEPHEN ROSTAIN

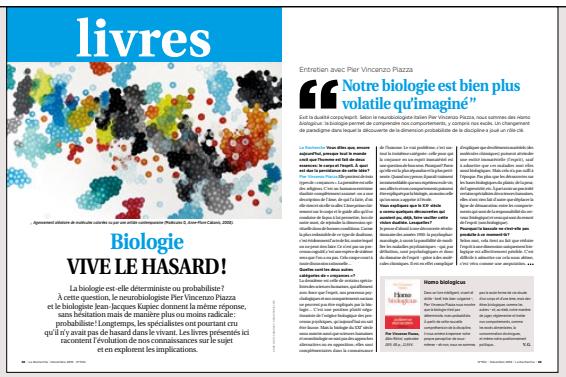
PALÉOANTHROPOLOGIE

LA COULEUR DE PEAU D'*HOMO SAPIENS*

Je pensais qu'*Homo sapiens*, originaire d'Afrique, avait la peau noire. Cela aurait été le cas pour nos ancêtres européens jusqu'à il y a 30 000 ans. Pourquoi la reconstitution illustrant votre dossier montre-t-elle un *Homo sapiens* à la peau apparemment blanche (*La Recherche* n° 556, p. 31) ?

Michel Mellet

Réponse d'Élisabeth Daynès, plasticienne **Mes reconstructions sont toujours mises en œuvre en étroite collaboration avec la communauté scientifique et étayées, selon les cas, par les dernières découvertes et publications. Lors de la commande de la reconstruction de Mandal Man, qui figure sur l'illustration en question, j'ai eu comme information qu'il vivait dans un climat froid. À ce moment-là, les scientifiques pensaient que cela impliquait une peau claire, car cela facilite la synthèse de vitamine D via l'exposition aux rayons UV. C'est la recommandation que j'ai suivie. Aujourd'hui, le seul critère du climat ne suffit pas à déterminer la couleur de peau. Des scientifiques ont établi qu'*Homo sapiens* était capable de synthétiser la vitamine D par la graisse absorbée dans son alimentation, notamment celle de renne. Il a donc pu garder une couleur de peau foncée plus longtemps qu'on ne le pensait. À ce jour, pour les reconstructions du Magdalénien et de l'homme de Cro-Magnon *[considérés maintenant comme faisant partie des premiers hommes modernes européens, NDLR]*, je travaille donc une peau foncée.**


livres

Entretien avec Pier Vincenzo Piazza

Notre biologie est bien plus volatile qu'imaginé"

Biologie

VIVE LE HASARD!

La biologie est-elle déterministe ou probabiliste ? À cette question, le neurobiologiste Pier Vincenzo Piazza et le biologiste Jean-Jacques Kupiec donnent la même réponse, sans hésitation mais de manière plus ou moins radicale : probabiliste ! Longtemps, les spécialistes ont pourtant cru qu'il n'y avait pas de hasard dans le vivant. Les livres présentés ici racontent l'évolution de nos connaissances sur le sujet et en explorent les implications.

ESPRIT ET PRINCIPE D'ÉMERGENCE

Le principe d'émergence est la création d'un niveau d'information non déductible des informations des éléments assemblés. Ainsi, l'observateur scientifique n'est pas déductible de la biologie. Mais il est capable d'en bouleverser les règles. Il existe donc deux directions à la causalité entre biologie et esprit. En réduisant l'esprit à la biologie, Pier Vincenzo Piazza n'aplatit-il pas cette dimension complexe (*La Recherche* n° 554, p. 68) ?

Jean-Pierre Legros

Réponse de Pier Vincenzo Piazza, neurobiologiste **Le concept d'*Homo biologicus* ne supprime pas les caractéristiques de l'esprit pour le rendre compatible avec la matière. Bien au contraire, en utilisant les découvertes de la biologie du XXIe siècle, il raconte comment les caractéristiques que nous lui attribuons peuvent maintenant être expliquées par la matière. L'une des clés de voûte de cette analyse est la compréhension de la façon dont la biologie se construit par une cascade de propriétés émergentes : ADN, protéines, cellules, organes, organisme, fonctions et, dans le cas du cerveau, pensée et esprit. Mais le principe d'émergence (l'apparition de fonctions que n'ont pas les éléments assemblés) n'implique pas un changement de dimension, où un niveau deviendrait immatériel. L'incarnation de l'esprit ne lui enlève rien, à l'exception d'une immatérialité qui le relègue depuis des millénaires dans une mystérieuse dimension astrale. D'après les ravages que les hommes ont faits en poursuivant cette légende, cela n'est pas forcément une mauvaise chose.**

GÉOGRAPHIE

MESURER UN FLEUVE

L'article consacré au Nil estime la longueur de ce fleuve à 6 700 km (*La Recherche* n° 555, p. 22). Or elle a été réévaluée à 6 895 km environ. Ne faudrait-il pas utiliser cette valeur, reprise par de nombreuses institutions ?

Christophe Giroud

Réponse d'Eduardo Garzanti, géologue **La mesure de la longueur d'un fleuve ou d'une rivière dépend de nombreux paramètres, notamment de l'échelle utilisée, de la façon dont on considère ses courbures, tresses, méandres, diversions, et ses affluents. En ce qui concerne le Nil, on prend souvent en compte la rivière Kagera, qui se trouve en Afrique de l'Est, en amont du lac Victoria. Celle-ci est elle-même divisée en quatre branches dont Ruvyironza, qui est généralement considérée dans le calcul de la longueur du Nil car c'est celle qui descend le plus au sud, au Burundi. Des questions similaires se posent pour le Mississippi et l'Amazone. De fait, pour toute rivière longue, les estimations varient. Je n'ai pas connaissance d'une convention universellement acceptée. Dans le cas de l'étude dont il est question dans l'article, cette précision n'est pas essentielle.**

Une question à nous poser ?

Écrivez-nous par courriel à **courrier@larecherche.fr** ou à l'adresse postale suivante :
Rédaction de « La Recherche », rubrique Courrier des lecteurs
41 bis avenue Bosquet 75007 Paris

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

La Recherche

Pour ne rien manquer de l'actualité des sciences, rendez-vous sur le site : www.larecherche.fr

SPÉCIAL COVID-19

Chaque jour, la rédaction se mobilise pour vous proposer l'éclairage de la communauté des chercheurs sur l'épidémie.

Et parce que la science continue d'avancer, retrouvez vos rubriques habituelles…

Entretiens

Chroniques

Dossiers

Fondamentaux

start-up

actualités

Archives

Une base de plus de 20 000 articles

Rejoignez la communauté des lecteurs de La Recherche sur Twitter et Facebook.

@maglarecherche

Magazine La Recherche

Pourquoi le coronavirus rend-il malade ?

Si la plupart des personnes infectées par SARS-CoV-2 ont des symptômes modérés, des syndromes de détresse respiratoire peuvent s'installer. Les mécanismes par lesquels le virus se propage dans le corps, les réponses immunitaires complexes et les variations interindividuelles expliquent ces différences.

Cela se passait il y a quatre mois. Déjà. Seulement. Le 31 décembre 2019, le bureau chinois de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) reçoit notification de 27 cas de pneumonie d'origine inconnue récemment survenus à Wuhan, dans la province du Hubei. Le pathogène est rapidement isolé et son génome séquencé au sein de laboratoires chinois. Le 9 janvier, les autorités sanitaires chinoises annoncent qu'il s'agit d'un coronavirus, apparenté à ceux qui ont causé, il y a quelques années, deux alertes sanitaires relatives à des pneumonies atypiques : SARS-CoV, coronavirus qui avait atteint les cinq continents entre novembre 2002 et juillet 2003, et provoqué une épidémie de « syndrome respiratoire aigu sévère » (Sras) responsable de 774 décès (la plupart en Chine continentale et à Hong Kong). Et MERS-CoV qui, depuis son émergence en 2012 au Moyen-Orient, a causé près de 860 décès dans cette région, principalement en Arabie saoudite. La séquence de ce nouveau coronavirus est mise à disposition de la communauté scientifique internationale le 12 janvier 2020. D'abord appelé 2019-nCoV, il est officiellement baptisé SARS-CoV-2 le 11 février par le Comité international de taxonomie des virus.

La plupart des personnes infectées par SARS-CoV-2 développent uniquement des symptômes « modérés » (allant de maux de tête à une fièvre élevée et une fatigue intense), voire si peu de symptômes qu'ils passent inaperçus. Mais, étant donné la capacité de diffusion du virus, la maladie qu'il provoque, nommée Covid-19, a d'ores et déjà causé bien plus de décès que les pneumonies provoquées par SARS-CoV et MERS-CoV. En France, au moment où nous mettons sous presse, le nombre de morts dépasse 20 000 personnes, un bilan plus grave que la canicule de 2003 ou que les épidémies de grippe annuelles. Comment SARS-CoV-2 nous rend-il, ou pas, malades ? Au bout de quatre mois d'épidémie, les avancées le disputent aux hypothèses.

La connaissance de l'intrus lui-même a rapidement progressé, s'appuyant en particulier sur les données acquises lors de l'épidémie de Sras. Comme tous les coronavirus, SARS-CoV-2 a un génome constitué d'un unique brin d'ARN, long d'environ 30 000 nucléotides. Ce génome est enclos dans une particule virale à l'apparence caractéristique : une sphère hérissée de protubérances. Nommée Spike, la protéine qui forme ces protubérances joue un rôle essentiel : grâce à elle, le virus se fixe à ses cellules cibles. Mais, pour qu'il y entre, il faut qu'après fixation, Spike soit légèrement modifiée, coupée par une enzyme située aussi à la surface de la cellule cible.

▲ *Quand un patient bascule dans la détresse respiratoire aiguë (SDRA), la ventilation devient indispensable (ici, à l'aide d'un masque de plongée, dans une clinique de Neuilly-sur-Seine).*

NIAID-RML - BENOIT TESSIER/REUTERS

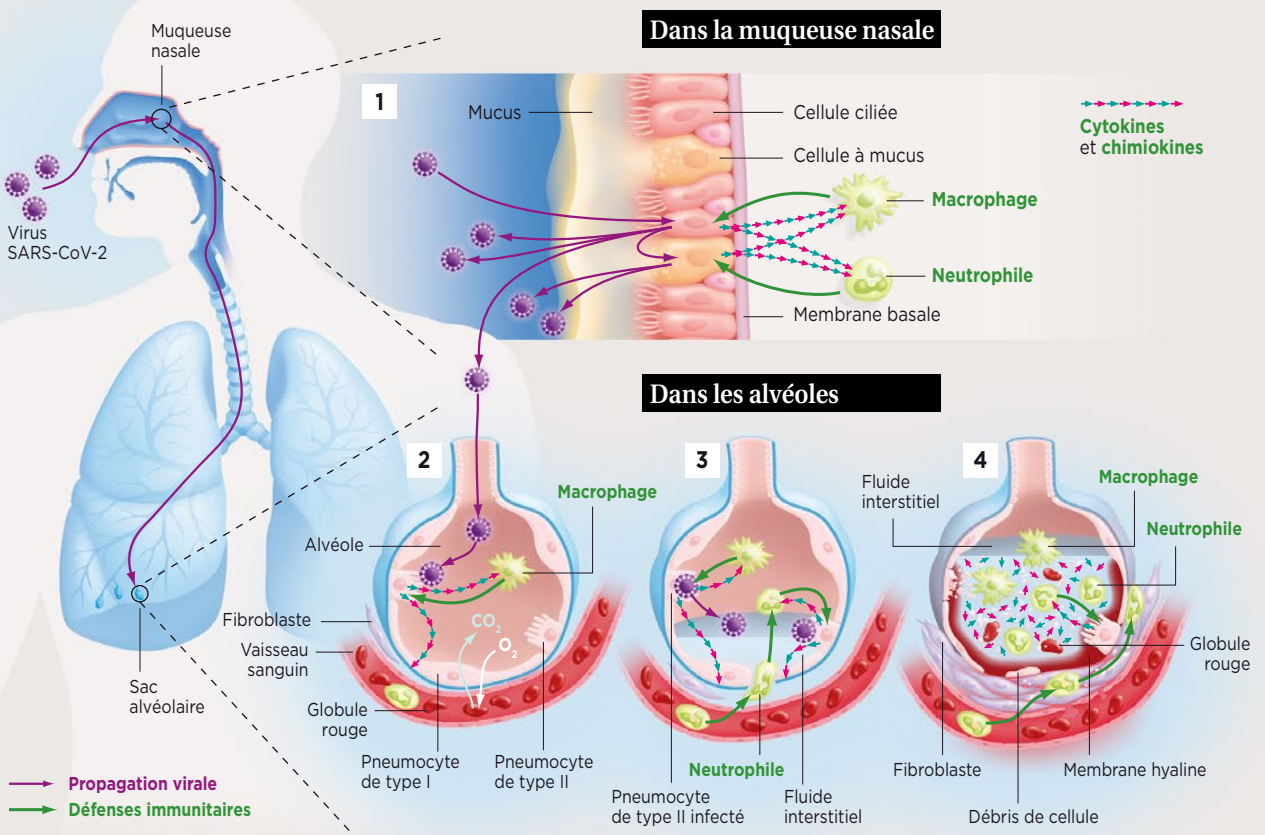
Sphère nasopharyngée

Très rapidement, la comparaison entre le génome du nouveau coronavirus et celui de ses deux prédécesseurs révèle que la protéine Spike de SARS-CoV-2, bien que différente de celle de SARS-CoV (sa séquence en acides aminés n'est qu'à 76 % identique), se fixe au même récepteur : une molécule nommée ACE2, dont on sait qu'elle est exprimée dans les alvéoles pulmonaires, les artères, le cœur, le rein ou encore la muqueuse intestinale. De plus, l'infection par SARS-CoV-2 passe par la même enzyme coupeuse, nommée TMPRSS2 (1). Et peut-être une autre enzyme, la furine (2).

Ces données n'offrent pas seulement des pistes moléculaires pour bloquer le virus (lire p. 18). Elles contribuent

Fig. 1 SARS-CoV-2 à l'assaut du système respiratoire

1 **Le coronavirus SARS-CoV-2** infecte la muqueuse nasale et nasopharyngée. Cela déclenche une défense immunitaire dite « innée »: les cellules infectées libèrent des molécules (cytokines et chimiokines) qui attirent des cellules immunitaires (macrophages, neutrophiles, lymphocytes NK) chargées de les éliminer, par destruction directe ou libération de diverses substances. C'est la réaction inflammatoire.
Cette première défense déclenche également la mise en place d'une réponse immunitaire spécifique qui aboutit, entre autres, à la production d'anticorps.



2 **En suivant les voies respiratoires,** le SARS-CoV-2 peut aller infecter le poumon profond, au niveau des alvéoles pulmonaires, là où s'effectuent les échanges gazeux entre l'air et le sang. Une pneumonie débute.

3 **Le virus infecte** les pneumocytes de type II, mais il est aussi repéré par des macrophages spécifiques des alvéoles, qui contribuent au déclenchement de la réponse immunitaire innée. Chez certaines personnes, l'infection est enrayée. Chez d'autres, elle s'accentue, avec des essoufflements très marqués.

4 **Parfois, le système immunitaire** surréagit, et l'inflammation dégrade à tel point cellules et tissus que les alvéoles se remplissent de débris, de fluide, de sang. Le tissu séparant alvéoles et vaisseaux sanguins s'épaissit et se rigidifie. À ce stade, les poumons ne peuvent plus remplir leur rôle. C'est le syndrome de détresse respiratoire aiguë, qui nécessite une ventilation artificielle.

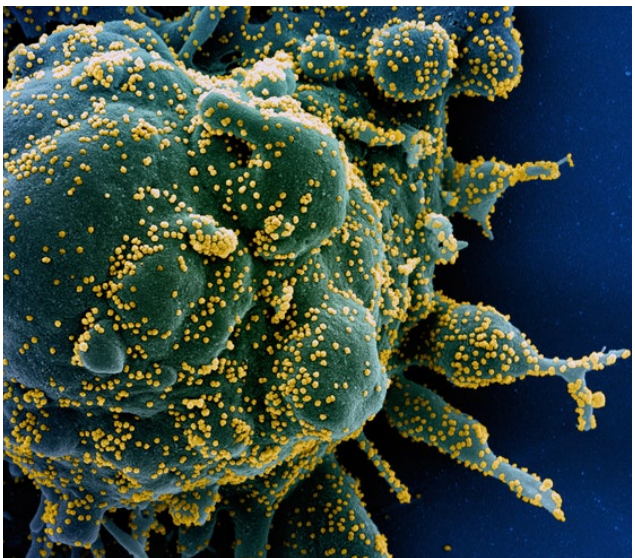
aussi à comprendre la pathologie Covid-19. Par exemple, y a-t-il d'abord une infection des voies respiratoires « hautes », puis des voies respiratoires « basses »? Les données temporelles font aujourd'hui défaut. En revanche, un faisceau d'éléments indique que SARS-CoV-2 peut infecter la muqueuse respiratoire de la sphère nasopharyngée – ce qui n'avait pas été mis en évidence pour le SARS-CoV, et encore moins pour le MERS-CoV, qui ne touchait que les zones profondes des voies respiratoires.

Parmi ces éléments figure une étude portant sur un groupe de patients dits « de Munich », faisant partie des tout premiers infectés en Allemagne. Dans la revue *Nature,* l'équipe de recherche berlino-munichoise de Christian Drosten et Clemens Wendtner rapporte avoir détecté la multiplication et l'excrétion de particules virales infectieuses dans la zone nasopharyngée, pas seulement dans les excrétions de toux provenant de zones plus profondes, comme c'était le cas pour SARS-CoV (3). *« Le nouveau coronavirus n'a pas besoin d'aller jusqu'aux poumons pour se répliquer, ce qui le rend d'autant plus transmissible »,* soulignait Christian Drosten dans un communiqué à ce sujet.

Ces données physiologiques sont corroborées par les très récents résultats obtenus dans le cadre du Human Cell Atlas (HCA), projet international lancé en 2016 avec pour objectif de recenser et de décrire tous les types cellulaires du corps •••

INFOGRAPHIE: SYLVIE DESSERT

••• humain, en dressant leur profil génétique et moléculaire. Directeur de recherche CNRS à l'Institut de pharmacologie moléculaire et cellulaire de l'université Côte d'Azur, Pascal Barbry est l'un des quatre coordinateurs du volet « Poumon » du HCA. *« Ces dernières années, nous avons constitué une base de données de tous les gènes exprimés pour chaque type de cellules que l'on trouve depuis le nez jusqu'à la 11e ramification de l'arbre bronchique,* explique-t-il. *Lorsque sont sortis les premiers articles suggérant que SARS-CoV-2 agissait via ACE2 et TMPRSS2, nous avons immédiatement cherché si certaines cellules épithéliales de la muqueuse respiratoire co-expriment de façon significative ces deux molécules. Et nous avons détecté un signal, pas très fort mais bien visible, au niveau des cellules ciliées et des cellules sécrétrices de mucus de la cavité nasale »* (4).



▲ *Vue colorisée au microscope électronique à balayage d'une cellule (en vert) en état de mort cellulaire infectée par des particules de virus SARS-CoV-2 (en jaune).*

Orage de cytokines

« La convergence d'éléments est telle que je suis convaincu que la porte d'entrée, le site primaire de multiplication du virus, c'est la cavité nasale, appuie Mustapha Si-Tahar, directeur de recherche Inserm au Centre d'étude des pathologies respiratoires, à l'université de Tours. *C'est par ailleurs très plausible, quand on voit l'assez faible proportion de personnes infectées qui présentent des symptômes pulmonaires sévères. »* Avec Christophe Paget, il est plus particulièrement responsable de l'équipe Inserm Infection respiratoire et immunité. Tous deux insistent sur le fait qu'on connaît encore très mal le déroulé de la réponse immunitaire dans le contexte du Covid-19. Mais si l'infection débute dans la muqueuse respiratoire nasale, alors la réponse immunitaire aussi (Fig. 1).

Comme pour toute infection, il s'agit d'abord d'une réponse immunitaire dite « innée », c'est-à-dire non spécifique de l'agresseur, qui se met en place par réaction directe des cellules infectées. Toutes les cellules de l'organisme sont en effet munies de « capteurs », externes ou internes, capables de reconnaître des motifs moléculaires d'alerte. Typiquement, dans le cas d'un virus à ARN simple brin comme le SARS-CoV-2, le brin d'ARN viral sera reconnu par des capteurs intracellulaires, nommés TLR7 ou RIG-I. Cela aboutit in fine à la production d'une cascade de molécules qui vont défendre l'organisme contre les agents pathogènes : des interférons à action antivirale directe, d'autres cytokines qui attirent sur le lieu de l'infection des cellules immunitaires capables de détruire les cellules infectées, et des facteurs de réparation tissulaire. S'enclenche aussi, en parallèle, une réponse dite « adaptative », spécifique du pathogène, mais plus lente à apparaître. Elle consiste en l'activation de lymphocytes T et B, qui deviennent dès lors capables de reconnaître spécifiquement tel ou tel antigène de l'intrus. Par exemple, les lymphocytes B activés se différencient en plasmocytes producteurs d'anticorps. *« Que cette réponse adaptative soit enclenchée lors d'une infection par le SARS-CoV-2, c'est certain,* précise Christophe Paget. *En revanche, pour l'instant, on ne sait rien de son efficacité, et encore moins de sa durée. »*

On ne sait pas non plus pourquoi, chez certaines personnes, l'infection touche le poumon profond. S'y propage-t-elle depuis la cavité nasale, faute d'une réponse immunitaire suffisamment efficace à ce niveau ? Ou le virus y accède-t-il, chez ces personnes, dès le départ ? On l'ignore. Ce que l'on sait en revanche, c'est l'identité des cellules touchées : les pneumocytes de type II, l'un des deux types de cellules qui bordent les alvéoles pulmonaires, et qui expriment la molécule ACE2.

L'infection de ces pneumocytes déclenche elle aussi une réponse immunitaire innée, par réaction des cellules infectées d'une part, mais aussi du fait de la présence de cellules de l'immunité innée spécifiques des alvéoles : les macrophages alvéolaires, grands détecteurs d'intrus. L'atteinte à la fonction respiratoire dépend des dommages causés aux cellules alvéolaires, donc à l'intégrité des alvéoles. Ces dommages ne sont pas seulement causés par le virus, qui détourne la machinerie cellulaire à son profit, affaiblissant ainsi les cellules infectées. Ils résultent aussi en partie de la réaction inflammatoire déclenchée pour le contrer, qui est délétère pour les cellules elles-mêmes.

LA RÉACTION INFLAMMATOIRE PEUT S'EMBALLER DE FAÇON DÉLÉTÈRE

Or, passé un certain stade de destruction tissulaire, cette réaction immunitaire s'emballe (ce qu'on appelle « l'orage de cytokines »), conduisant à l'accumulation de débris et de fluides dans les alvéoles et à l'épaississement du tissu interstitiel qui les sépare des capillaires sanguins. Cela empêche toute oxygénation du sang, et toute évacuation du CO_2. À ce stade, le patient souffre de syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA), ce qui

NIAID

nécessite son intubation et sa ventilation artificielle, ou même son placement sous oxygénation extracorporelle.

Études de cohorte

Comment se fait-il que certains patients basculent dans cet état, alors que d'autres y échappent? Pour le comprendre et améliorer la prise en charge des patients, de très nombreux services de réanimation français contribuent depuis le 19 mars à la constitution d'une base de données des patients Covid-19, à l'initiative du Réseau européen de recherche clinique en ventilation artificielle (Reva). *« Nous regroupons les données relatives aux patients lors de leur admission (âge, sexe, IMC, diabète, hypertension…), les modalités de prise en charge, et les données caractérisant l'évolution des patients,* explique Alexandre Demoule, chef du service de médecine intensive-réanimation de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, et membre du conseil scientifique de Reva. *Comme il s'agit de variables classiquement consignées par les services de réanimation, nous avons pu récupérer beaucoup de données a posteriori, et le registre comprend déjà plus de 2 000 patients. »*

Une cohorte de cette taille, avec la puissance statistique qu'elle confère, devrait aussi permettre de mieux discerner les facteurs de risque de développer un SDRA. Par exemple, les hommes sont-ils plus à risque que les femmes d'être atteints par une forme grave, comme les données globales d'hospitalisation et de décès peuvent, à première vue, le laisser penser? L'obésité est-elle non seulement un facteur de risque (lire l'encadré ci-dessous), mais le principal facteur conduisant à développer un SDRA? Seul ce type d'étude d'ampleur peut permettre d'en avoir le cœur net.

De la même façon, seules des études de cohorte seront à même de fournir une réponse fiable quant à la cinétique de l'infection et aux caractéristiques – efficacité et durée – de la réponse immunitaire. En France, le projet French Covid-19 a commencé mi-mars à recruter les patients hospitalisés. Pour chacun, le prélèvement d'échantillons nasopharyngés est effectué à différents moments de la maladie (afin de suivre la cinétique virale) et des prélèvements sanguins sont réalisés tous les deux jours jusqu'à la phase de convalescence, puis un mois, trois mois, et six mois après (afin d'évaluer la réponse immunitaire). Un volet génétique vise également à identifier d'éventuelles susceptibilités à développer une forme grave de la maladie. Objectif? Contribuer à la connaissance de la maladie dans le cadre de cette épidémie, mais aussi… en prévision de la prochaine. **Cécile Klingler**

(1) M. Hoffmann *et al., Cell, 181,* 271, 2020.

(2) B. Coutard *et al., Antiviral Res., 176,* 104742, 2020.

(3) R. Wölfel *et al., Nature,* doi.org/10.1038/s41586-020-2196-x, 2020.

(4) W. Sungnak *et al., Nat. Med.,* à paraître (arXiv:2003.06122, 2020).

L'obésité, facteur de vulnérabilité

Outre-Manche, le Centre de recherche sur les soins intensifs (Icnarc) délivre régulièrement un rapport sur les patients Covid-19 hospitalisés en unités de soins intensifs. Avec, entre autres, une répartition selon leur indice de masse corporelle (IMC). Au 10 avril, ces données concernaient 3 265 patients (1) : 0,6 % avaient un IMC inférieur à 18,5 (« maigreur »); 25,8 % un IMC entre 18,5 et 25 (« corpulence normale »); 35 % un IMC entre 25 et 30 (« surpoids »); 31,3 % un IMC entre 30 et 40 (« obésité modérée à sévère »), et 7,2 % un IMC supérieur à 40 (« obésité morbide »).

Autrement dit, les patients obèses constituent près de la moitié des admis en réanimation. Surtout, l'obésité s'accompagne de davantage de décès : de 54 % de personnes rétablies contre 46 % de décès chez les patients maigres, et 50-50 pour les sujets de corpulence normale, on passe à 46-54 pour les personnes présentant une obésité modérée à sévère, et à 43-57 pour celles souffrant d'obésité morbide. En 2009-2010 déjà, les personnes obèses avaient payé un lourd tribut à la grippe H1N1. D'où vient cette vulnérabilité aux infections? *« Entre autres mécanismes, le ratio entre deux hormones impliquées dans la régulation de la satiété, la leptine et l'adiponectine, augmente,* souligne Mustapha Si-Tahar, spécialiste de l'immunité des infections respiratoires. *Or la leptine est pro-inflammatoire, alors que l'adiponectine est anti-inflammatoire. »*

Résultat : sur le plan immunitaire, l'obésité s'accompagne d'une inflammation chronique de base. Qui plus est, ce ratio leptine/adiponectine accru diminue les capacités de régulation de la réponse immunitaire. Autrement dit, en cas d'infection, la réaction inflammatoire innée s'ajoute à l'inflammation de base, et le système censé la réguler est défaillant. Double peine. C. K.

(1) icnarc.org/Our-Audit/Audits/Cmp/Reports

▲ *Les personnes en fort surpoids avaient déjà été sévèrement touchées lors de la grippe H1N1.*

BRAZIL PHOTO PRESS/VANESSA CARVALHO/AFP

Une course mondiale aux traitements

Solidarity, Discovery, Hycovid… Chaque jour voit apparaître un nouvel essai clinique destiné à tester l'efficacité de molécules contre le virus SARS-CoV-2. L'effort de recherche est international et massif. Il s'appuie notamment sur les travaux qui ont été menés ces dernières années sur d'autres virus.

Le 22 mars, l'Inserm a lancé un essai clinique européen baptisé Discovery, destiné à tester l'efficacité de différents traitements curatifs contre le virus SARS-CoV-2, responsable de la pandémie mondiale de Covid-19. Au total, 3 200 patients hospitalisés et testés positifs seront inclus dans cet essai clinique et répartis équitablement dans cinq groupes. Le premier bénéficiera de soins standards – c'est-à-dire le meilleur type de soins connus – tandis que les quatre autres recevront différentes molécules antivirales ou modifiant l'immunité, déjà connues pour la plupart dans le traitement d'autres pathologies. Un autre essai similaire, baptisé « Solidarity », a été lancé le 20 mars par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Au moment où nous mettons sous presse, les premiers résultats étaient annoncés pour la fin du mois d'avril.

Ces deux essais ont été largement médiatisés, mais ils sont loin d'être les seuls. La plateforme ClinicalTrials.gov, qui inventorie l'ensemble des essais cliniques dans le monde et en détaille les protocoles, en recense 134 de phase III au moment où nous bouclons (comparant l'efficacité du nouveau traitement à celle d'un placebo ou du traitement de référence) relatifs au Covid-19. Et la liste s'allonge chaque jour. Pour la plupart, ces essais testent les mêmes familles de molécules antivirales. Celles-ci n'ont pas été choisies par hasard : *« Nous avons analysé les données issues de la littérature scientifique concernant les coronavirus SARS et MERS, ainsi que les premières publications sur le SARS-CoV-2 émanant de la Chine, pour aboutir à une liste de molécules antivirales à tester,* précisait fin mars Florence Ader, infectiologue aux Hospices civils de Lyon et responsable de l'essai Discovery, lors d'une conférence de presse. *La liste de ces médicaments potentiels est fondée sur la liste des traitements expérimentaux classés comme prioritaires par l'OMS. »*

LA PLUPART DES ESSAIS TESTENT LES MÊMES FAMILLES DE MOLÉCULES

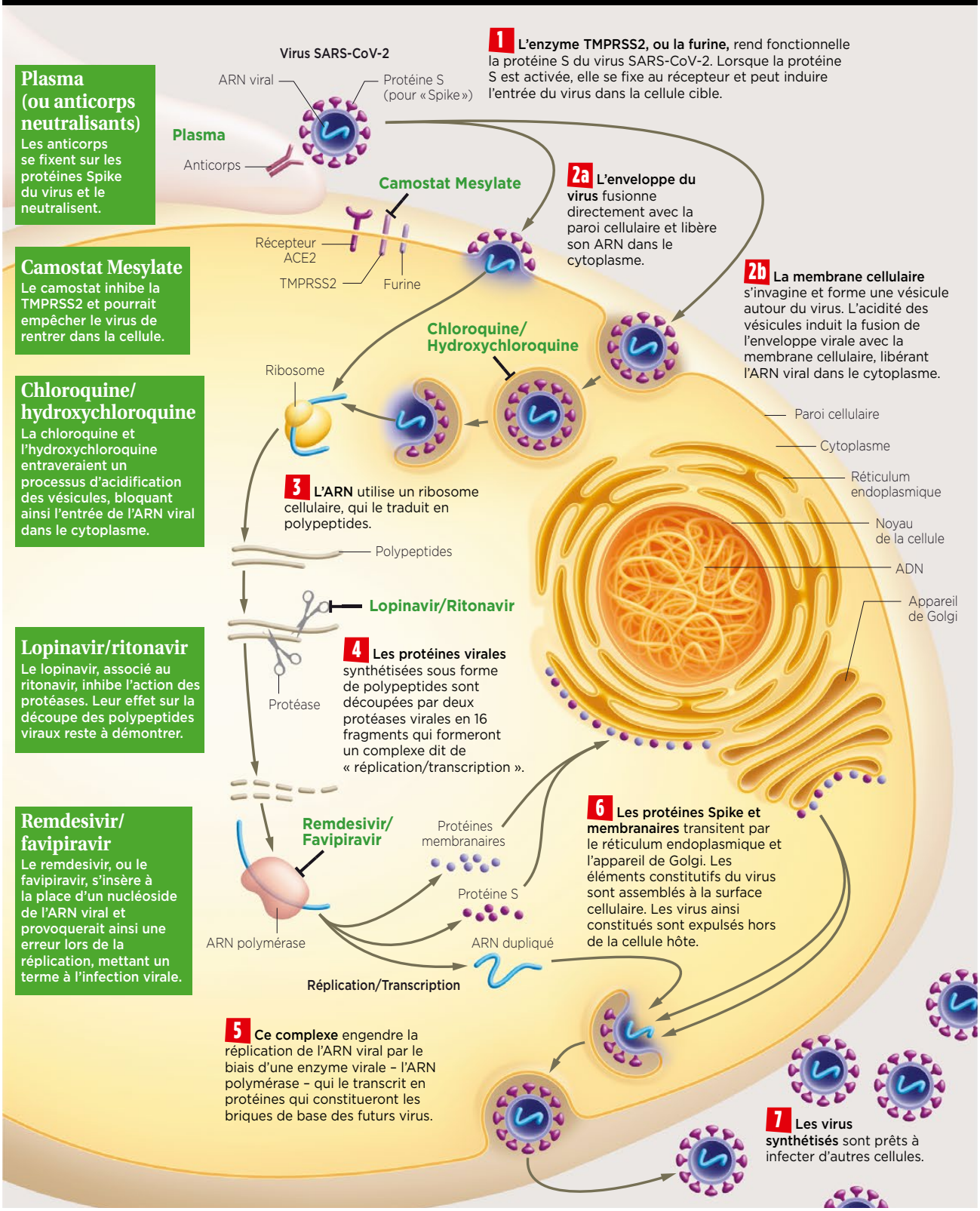
Pour bien comprendre comment ces molécules agissent, il faut d'abord comprendre le fonctionnement du virus (Fig. 1). Comme tous les coronavirus, le SARS-CoV-2 possède une couronne de protéines S (pour Spike), grâce auxquelles elle peut se fixer à la cellule hôte et y insérer son ARN. Une fois cette étape franchie, son ARN est transcrit en de longues molécules (polypeptides). Celles-ci sont ensuite découpées par une enzyme appelée « protéase ». Les protéines issues de cette découpe forment un complexe permettant ensuite au virus de se répliquer.

Parmi les médicaments testés, le camostat, utilisé dans le traitement des pancréatites, agit dès la première étape en inhibant une enzyme qui coupe la protéine S pour la rendre fonctionnelle, empêchant l'entrée du virus dans la cellule hôte. Une autre molécule, l'hydroxychloroquine, prescrite habituellement contre le paludisme mais aussi contre le lupus et la polyarthrite rhumatoïde, agit sur une des deux voies d'entrée possibles du virus dans la cellule. *« Nous ne savons pas encore comment le SARS-CoV-2 pénètre à l'intérieur de la cellule hôte, mais deux hypothèses sont envisagées : soit l'enveloppe du virus fusionne directement avec la paroi cellulaire, soit la paroi cellulaire forme une enveloppe autour du virus pour le faire entrer par un processus appelé "endocytose",* précise Anne Goffard, virologue à l'Institut Pasteur de Lille. *L'hydroxychloroquine bloquerait uniquement ce dernier mécanisme, en empêchant la mise en place d'un gradient de pH nécessaire à l'endocytose de part et d'autre de la membrane cellulaire. »*

Un autre antiviral au banc d'essai est le lopinavir. Utilisé dans le traitement du virus de l'immunodéficience humaine (VIH), il pourrait bloquer des protéases virales et empêcher ainsi la formation d'un complexe permettant au virus de se répliquer. Il est associé au ritonavir, autre antiviral qui ralentit la dégradation du lopinavir par l'organisme. Dans certains essais cliniques – c'est le cas de Discovery –, on lui ajoute également de l'interféron bêta, qui régule la réponse antivirale. Enfin, le remdesivir, initialement testé contre le virus Ebola, présente in vitro une activité intéressante contre le SARS-CoV-2. Il appartient •••

NIAID-RML

Fig. 1 Les pistes pour bloquer le virus



INFOGRAPHIE: SYLVIE DESSERT

DE L'ESPOIR AVEC LE TRANSFERT DE PLASMA ?

▲ *L'Établissement français du sang réalise les premiers prélèvements pour l'essai Coviplasm.*

Injecter du plasma – la partie liquide du sang dans laquelle on trouve notamment les anticorps – de personnes guéries du Covid-19 à des malades : c'est l'idée de l'essai clinique Coviplasm lancé par l'Assistance Publique-Hôpitaux de Paris le 7 avril, et dont les premiers résultats sont attendus pour fin avril-début mai. 600 millilitres (ml) de plasma devraient être prélevés sur près de 200 personnes guéries depuis au moins 14 jours. Il sera injecté en deux unités de 200 à 220 ml à trente patients (sur les soixante que comprend l'essai), qui seront transfusés au sixième jour de la maladie, puis deux autres 24 heures plus tard, en l'absence d'effets secondaires indésirables. Les autres recevront un placebo. Objectif : renforcer les défenses immunitaires de ces malades pour lutter contre le virus. Deux essais menés en Chine, dont les résultats ont déjà été publiés (1), montrent pour l'instant un effet bénéfique, avec une diminution des symptômes, mais pour un nombre de patients bien moindre (5 et 10).

(1) K. Duan *et al.*, *PNAS*, doi : 10.1073/pnas.2004168117, 2020 ; Shen C. et al., JAMA, doi : 10.1001/jama.2020.4783, 2020.

••• à la famille des analogues nucléosidiques : au moment de la réplication du virus, il se substitue à l'un des nucléosides de l'ARN viral et induirait ainsi une erreur lors de la réplication du virus, entraînant un effet mutagène.

Si les médicaments testés reviennent souvent d'un essai à l'autre, le profil des patients et le moment de leur inclusion varient. « *La recherche déployée actuellement s'adresse à plusieurs niveaux de prise en charge,* insistait Florence Ader dans un point presse de l'Inserm le 7 avril. *Certains protocoles traitent de la phase pré-hospitalière, d'autres s'intéressent aux patients hospitalisés en secteur de médecine, et enfin d'autres essais se focalisent sur les cas les plus graves, en réanimation. Ces études n'apportent donc pas les mêmes informations parce qu'elles ne s'adressent pas aux mêmes patients.* »

Dans les essais Discovery et Solidarity, seuls des patients hospitalisés, testés positifs, essentiellement avec des symptômes modérés à sévères, sont inclus. D'autres équipes ont choisi de tester les molécules à un stade plus précoce, avant l'apparition des premiers symptômes, ou chez des patients présentant des symptômes légers à modérés, avec des risques de basculer dans des états plus sévères. C'est le cas dans la province d'Alberta, au Canada. Une étude dirigée par Michael Hill, de l'université de Calgary, vise ainsi à tester l'efficacité de l'hydroxychloroquine en double aveugle (*) auprès de 1 660 participants âgés de plus de 40 ans ou bien présentant des facteurs de risque, comme une immunosuppression ou une maladie chronique. Seuls les patients testés positifs mais non hospitalisés seront inclus, le but étant de savoir si le traitement pris assez tôt permet de minimiser le nombre de cas sévères. « *Nous devrions terminer le recrutement d'ici à la mi-mai. Le temps de suivre les patients et de traiter les données, nous espérons avoir des premiers résultats d'ici à juin* », prévoit Michael Hill. Pour sa part, dans le cadre de l'essai Hycovid, le CHU d'Angers teste l'hydroxychloroquine auprès de 1 300 patients à haut risque de dégradation clinique afin de déterminer si, prise à un stade léger à modéré, elle est efficace.

▲ *Selon la plateforme ClinicalTrials.gov, 134 essais cliniques de phase III consacrés au Covid-19 sont en cours.*

Limiter la contagiosité

Selon les conclusions d'un premier essai baptisé Lotus China, mené auprès de 199 patients par une équipe chinoise, le duo lopinavir/ritonavir ne serait pas efficace à un stade trop avancé de la maladie (1). « *Pour donner des résultats, les approches antivirales doivent se focaliser sur la première phase de la maladie, lors de l'apparition des premiers symptômes* », estime Étienne Decroly, directeur de recherche CNRS au laboratoire architecture et fonction des macromolécules biologiques, à Marseille.

L'intérêt des stratégies antivirales ne repose pas uniquement sur le traitement des malades, il s'inscrit aussi dans une démarche prophylactique. « *À terme, lorsqu'on aura identifié la ou les molécules les plus efficaces, elles pourront être administrées aux personnes susceptibles d'avoir été contaminées (proches de malades ou personnel hospitalier), afin de limiter leur contagiosité en abaissant leur charge virale* », prévoit Étienne

(*) **Un essai clinique en double aveugle** est un essai dans lequel ni le patient ni le prescripteur ne savent si le traitement donné est la molécule active ou le placebo.

ROLLAND QUADRINI / IP3/MAXPPP - CRAIG LASSIG/REUTERS

Decroly. Ce type d'approche est à l'étude, notamment dans l'essai clinique en double aveugle Covidaxis, lancé par les CHU de Saint-Étienne et d'Angers, ainsi que par l'hôpital Bichat, à Paris. Cet essai se concentre sur les soignants exposés au Covid-19, qui recevront de manière prophylactique de l'hydroxychloroquine ou le duo lopinavir/ritonavir versus un placebo dans les deux cas. L'université Duke, aux États-Unis, prévoit quant à elle de recruter 15 000 travailleurs médicaux pour tester l'hydroxychloroquine en traitement préventif. Enfin, à Toronto, l'association lopinavir/ritonavir sera évaluée en prophylaxie auprès de 1 220 personnes en contact avec des malades.

Si ces molécules se révèlent inefficaces, d'autres pistes sont déjà explorées. Bruno Coutard, de l'unité des virus émergents à l'université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont ainsi testé 1 520 molécules brevetées (pas uniquement des antiviraux) et approuvées par diverses agences de régulation (2). « *Quatre-vingt-dix molécules ont montré leur efficacité en diminuant l'infection de la cellule, dont l'azithromycine et la chloroquine et ses dérivés* », rapporte Étienne Decroly, coauteur de ce travail. D'autres pistes prometteuses sont aussi à l'étude, comme le transfert de plasma de patients convalescents (lire l'encadré), en attendant la mise au point d'un vaccin, qui pourrait prendre douze à dix-huit mois.

Bérénice Robert et Gautier Cariou

(1) B. Cao *et al., NEJM,* doi/10.1056/NEJMoa2001282, 2020.

(2) F. Touret *et al., BioRxiv,* doi:10.1101/2020.04.03.023846, 2020.

DR

3 questions à Olivier Schwartz

« Nous travaillons à partir du vaccin de la rougeole »

La Recherche Quel est le principe des vaccins en cours de développement contre le nouveau coronavirus SARS-CoV-2 ?

Olivier Schwartz Les vaccins visent à induire, dans l'organisme, la production d'anticorps spécifiques contre le spicule – ou protéine S –, qui permet au virus d'accéder à l'intérieur de la cellule hôte. C'est un procédé classique, et de nombreux essais sont en cours. À l'Institut Pasteur, nous travaillons par exemple sur une version modifiée du vaccin de la rougeole. On utilise le virus atténué de la rougeole auquel on ajoute un morceau de la protéine S du virus, protéine responsable de la « couronne » observée à la surface des coronavirus et à l'origine de leur nom. L'injection de ces deux éléments permet d'établir une réaction immunitaire adaptative et notamment une production d'anticorps dirigés contre le spicule. Notre objectif premier est de vérifier si ces derniers ont un effet protecteur contre le virus. L'avantage du vaccin de la rougeole est qu'il a été utilisé partout dans le monde par des milliards de personnes. On connaît sa fiabilité, son innocuité et son efficacité.

Selon la coalition internationale Cepi (Coalition for Epidemic Preparedness Innovations), 115 vaccins sont à l'étude dans le monde, dont 78 sont actifs contre le virus (1). En plus du vaccin contre la rougeole, quelles autres pistes sont explorées ?

Il y a par exemple l'utilisation de vecteurs à base de lentivirus, un virus de la famille du VIH, rendu inactif, auquel on ajoute des antigènes viraux. D'autres équipes testent l'inoculation d'une séquence d'ARN viral de manière à ce que l'organisme lui-même produise le spicule à partir de cette séquence. À l'Institut Pasteur, nous lançons également un essai à base d'ADN (projet SCARD SARS-Cov-2). Il s'agit cette fois d'injecter de l'ADN, sous forme de plasmide, codant un antigène d'intérêt pour induire une production d'anticorps contre cet antigène. Deux antigènes candidats ont déjà été conçus, basés sur la protéine S du virus. Mais ces approches sont encore en phase préclinique, chez l'animal.

VIROLOGUE Olivier Schwartz est le responsable de l'unité virus et immunité de l'Institut Pasteur.

Quelle piste est donc la plus avancée à l'Institut Pasteur ?

La stratégie qui est fondée sur l'utilisation du vaccin rougeole. Une première version a été mise au point. Il s'agit de valider la meilleure séquence du spicule à introduire. De fait, celle-ci comprend plusieurs sous-parties qui n'ont pas nécessairement le même effet protecteur. Par ailleurs, il faut s'assurer de la stabilité de l'assemblage entre le virus atténué et l'antigène, et tester sur des modèles animaux si les anticorps qu'ils produisent neutralisent bien le virus. À la suite de cela, un lot clinique peut être préparé et, d'ici quelques semaines ou mois, des essais pourront démarrer. Les premières études cliniques sur l'homme, destinées à tester l'absence de toxicité, devraient débuter à partir de juillet. Si toutes les étapes sont franchies, la création du vaccin prendra douze à dix-huit mois.

Propos recueillis par Mathias Germain

(1) T. Thang Le *et al., Nat. Rev. Drug Discov.,* doi:10.1038/d41573-020-00073-5, 2020.

Les tests de dépistage, clés du déconfinement

Pour organiser un retour progressif à la « normale », les autorités sanitaires disposent de deux instruments : les tests diagnostiques et sérologiques. Les premiers ont pris de l'avance par leur fiabilité, mais les deux devront encore progresser en termes de rapidité et de facilité d'utilisation.

« *L'utilisation la plus large possible des tests et la détection sont une arme privilégiée pour sortir au bon moment du confinement* », a souligné le président de la République, Emmanuel Macron, le 13 avril. Il a ainsi indiqué que le nombre de tests réalisés chaque jour allait augmenter, et qu'à partir du 11 mai prochain, toute personne qui présente des symptômes pourrait être systématiquement testée. Comment fonctionne ce dépistage ? Deux méthodes de tests diagnostiques sont possibles : détecter, à partir de prélèvements effectués dans le nez, le pharynx ou dans la salive, le génome viral (l'ARN) ou les protéines virales. La grande majorité de ces tests se fondent sur l'analyse du matériel génétique, effectuée à l'aide d'un outil de biologie moléculaire appelé RT-PCR. Cette technique combine deux actions : une enzyme, la reverse transcriptase (RT), transforme les séquences ARN en séquences ADN ; puis une autre enzyme, la polymérase, duplique en très grandes quantités les séquences ADN obtenues précédemment (polymerase chain reaction ou PCR). Celles-ci sont ensuite analysées au moyen de sondes fluorescentes.

Évidemment, les biologistes ont adapté cette technique au nouveau virus. Cela a été rendu possible grâce au séquençage complet de son génome. Les virologues ont alors sélectionné les séquences à cibler – les plus spécifiques – pour qu'il n'y ait pas de confusion avec d'autres génomes viraux. Le laboratoire de Christian Drosten, à l'Institut de virologie de l'hôpital universitaire de la Charité, à Berlin, en coopération avec des équipes universitaires en Europe et à Hong Kong, a ainsi publié le 23 janvier les détails d'un test de diagnostic (RT-PCR) qui détecte le SARS-CoV-2 (1). Pour le dépistage de première ligne, il recommande de cibler de courtes séquences qui composent le gène viral E ; si besoin, un test de confirmation peut suivre, qui détecte d'autres courtes séquences appartenant au gène viral RdRp. Ce travail a constitué la base des 250 000 premiers kits de détection que l'Organisation mondiale de la santé a envoyés à 159 laboratoires à travers le monde début février. Depuis, de nombreux protocoles de détection par RT-PCR ont été mis au point, combinant d'autres séquences génétiques cibles.

Diagnostiquer très vite

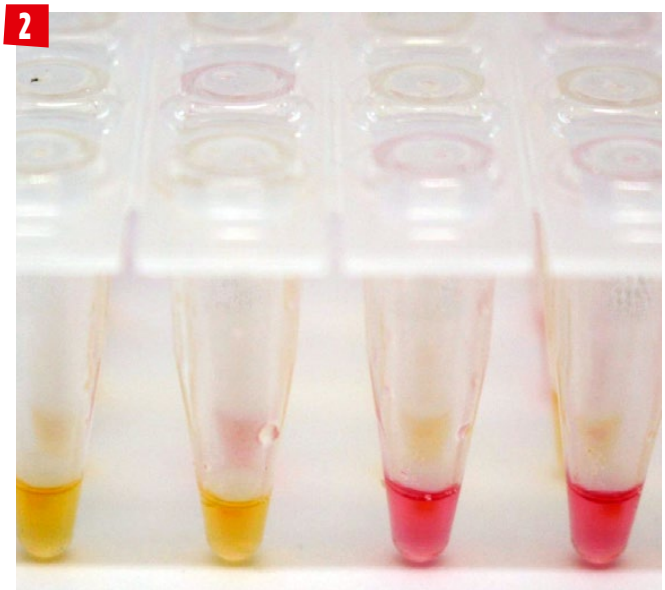
D'une manière générale, les tests de RT-PCR sont fiables : leur spécificité, c'est-à-dire leur capacité à détecter le bon virus, est excellente. La sensibilité (ne pas avoir de faux négatifs), elle, a parfois été moyenne, entre 53 et 88 %. Ce bilan mitigé a une explication : la sensibilité varie selon que le prélèvement a été fait correctement et au bon moment. En effet, la charge virale évolue dans le temps, et le virus peut être absent du nez mais présent dans les poumons.

Si le test diagnostique RT-PCR est devenu un standard dans la lutte contre la pandémie, la détection et la surveillance de foyers contagieux lors du déconfinement nécessitent des tests diagnostiques plus rapides et faciles à manipuler sur le terrain. « *Il y a une demande très forte de la part de la société,* souligne Franck Molina, directeur du laboratoire Sys2Diag (CNRS) à Montpellier et membre du Comité analyse recherche et expertise

NIAID-RML

DÉTECTER L'IMMUNITÉ, UN ENJEU MAJEUR

En pratiquant des tests sérologiques sur plusieurs échantillons représentatifs de la population, on pourra déterminer quel pourcentage de la population est immunisé à un moment donné et décider d'une stratégie : si peu de personnes sont immunisées, comme c'est le cas aujourd'hui, cela ne sert à rien de tester tout le monde pour obtenir une majorité de résultats négatifs. En revanche, des tests sérologiques fiables permettront à des personnes très exposées – soignants, caissiers, personnels des Ehpad, pharmaciens… – de savoir avec certitude s'ils sont immunisés, donc s'ils ont besoin ou non de continuer à se protéger. M.-L. T.



▲ *(1) La méthode de test diagnostique la plus utilisée consiste à détecter le génome viral au moyen d'un prélèvement dans le nez ou le pharynx. (2) Une autre technique recherche cet ARN viral dans la salive (ici, le test EasyCov). (3) Les tests sérologiques visent à confirmer l'immunité en détectant des anticorps neutralisants.*

BRIAN SNYDER/ REUTERS - ALESSANDRO SERRANO/MAXPPP - SYS2DIAG - CNRS

créé par le gouvernement français afin de le conseiller dans la lutte contre la pandémie de Covid-19. *L'idée est de diagnostiquer très vite sur le terrain quelqu'un de contagieux. C'est très important! Par exemple, les dentistes font avec leur fraise des aérosols de salive. Imaginez qu'ils reçoivent des personnes porteuses du virus…* »

Dans ce domaine, une course féroce s'est engagée entre sociétés de biotechnologies pour élaborer des tests rapides. Comme pour les tests diagnostiques standards, certains visent à détecter la présence des protéines virales, d'autres l'ARN viral. Le laboratoire Sys2Diag a par exemple mis au point le test EasyCov, qui détecte l'ARN viral dans la salive en trente minutes. La technique est en cours d'expérimentation au CHU de Montpellier, en double aveugle, auprès de patients testés positifs au Covid-19 et du personnel soignant hospitalier supposé négatif. Les résultats devraient être connus début mai.

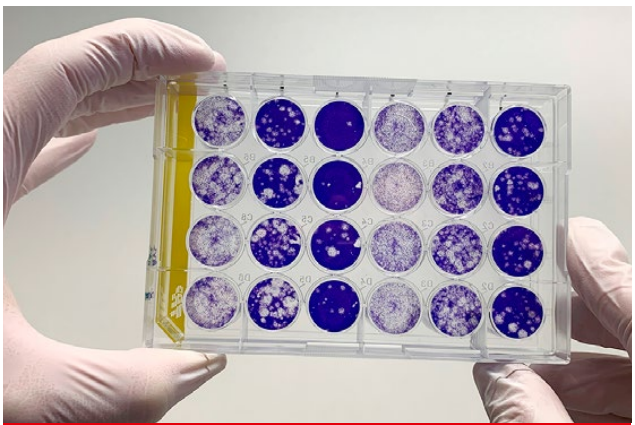
Le contrôle de l'épidémie repose également sur les tests sérologiques. Ils permettent de savoir si une personne a été infectée en détectant la présence d'anticorps. En effet, dix à douze jours après avoir été contaminée par le SARS-CoV-2, toute personne, qu'elle ait ou non présenté des symptômes, développe des anticorps pour combattre l'infection. Les anticorps sont des protéines, les immunoglobulines notées Ig. Elles sont produites lorsque des cellules du système immunitaire – les lymphocytes T et B – rencontrent les antigènes du virus. Certains anticorps sont dits protecteurs ou neutralisants : dirigés contre les antigènes de surface du virus, ils perturbent les premiers temps de la multiplication virale. « *Pour le SARS-CoV-2, les anticorps neutralisants sont ceux qui sont capables de reconnaître la protéine Spike. Ils vont se fixer sur elle et neutraliser l'entrée du virus dans la cellule cible* », explique Olivier Schwartz, directeur de l'unité virus et immunité de l'Institut Pasteur.

IL FAUT ARRIVER À DÉTECTER LES « BONS » ANTICORPS, LES NEUTRALISANTS

Les tests sérologiques réalisés à partir du sérum sanguin ont pour objectif de détecter les anticorps, afin de savoir si une personne a été infectée et, éventuellement, si elle est immunisée. Pour ce deuxième objectif, encore faut-il que les tests détectent les « bons » anticorps – les neutralisants – et qu'ils mesurent si la personne en a une concentration suffisante pour être immunisée, au moins pour quelques mois. « *Il ne faut pas laisser croire aux gens que "présence d'anticorps = protection" car ils n'en ont peut-être pas assez, ou alors pas les bons. Ils pourraient se croire protégés, alors qu'ils ne le sont pas* », avertit Marc Eloit, responsable du laboratoire découverte de pathogènes à l'Institut Pasteur qui, avec d'autres équipes de l'institut, travaille d'arrache-pied à la mise au point de ces tests.

« *Le cas particulier des* •••

••• *patients asymptomatiques pose un vrai défi car on ne sait pas si les personnes infectées de manière très discrète ont développé assez d'anticorps neutralisants pour éviter d'être réinfectées »,* reprend Marc Eloit. Le niveau d'anticorps neutralisants suffisant pour procurer une immunité durable est donc un paramètre clé des recherches en cours. Son équipe travaille à partir de divers prélèvements disponibles – premiers patients infectés de l'Oise, donneurs de sang, soignants de l'hôpital Necker… –, afin d'établir des corrélats de protection : types d'anticorps, capacités neutralisantes, quantité nécessaire, durée de l'immunité acquise. Ensuite, ces corrélats pourront être transposés sur des tests pratiqués de manière fiable et à grande échelle. C'est un enjeu considérable pour organiser le déconfinement car ils permettront de savoir quelle proportion de la population est immunisée (lire l'encadré p. 22).



▲ *Les tests sérologiques devront prouver leur fiabilité mais aussi leur rapidité, afin de permettre un dépistage de masse.*

Reste une question : comment parvenir rapidement à produire ces tests sérologiques fiables et à grande échelle ? En sérologie, la façon la plus fiable d'étudier les anticorps neutralisants est de mettre les cellules du prélèvement (le sérum sanguin) en présence du virus. Mais cela nécessite de travailler avec des virus vivants, dans un laboratoire protégé (dit « de niveau P3 »), ce qui est long à mettre en œuvre et coûteux. Pour déterminer les corrélats de protection du virus, les chercheurs de l'Institut Pasteur utilisent donc un pseudo-type, autrement dit un virus apparenté à celui du sida (VIH) mais rendu inoffensif, dont on substitue les glycoprotéines du VIH par celles du SARS-CoV-2.

Ce test de substitution sert actuellement de référence pour établir les caractéristiques des anticorps. « *Mais il est trop lent – deux à trois jours pour obtenir le résultat – pour un dépistage de masse,* explique Marc Eloit. *Donc, dès que ces corrélats de protection seront établis, pour dépister massivement, on va recourir aux tests de liaison de type Elisa* (enzyme-linked immunosorbent assay). *Fondés sur la liaison anticorps-virus, ils peuvent détecter n'importe quel anticorps se fixant sur le virus mais sans qu'il soit forcément neutralisant.* » Avantage :

LES TESTS SERONT CALIBRÉS SUR LES CORRÉLATS DE PROTECTION DU VIRUS

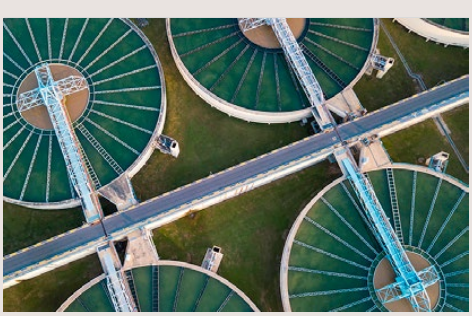
ils peuvent fonctionner à haut débit avec des plaques analysant 96 sérums ou plus à la fois et donner des résultats en quelques heures, avec une indication de la quantité d'anticorps présents. Inconvénient : pour qu'ils soient fiables, il faut les calibrer sur les corrélats de protection du virus, donc attendre que ces derniers soient établis. « *Quant aux auto-tests bandelettes, très médiatisés, leurs performances nécessitent une évaluation au cas par cas* », souligne Marc Eloit.

Marie-Laure Théodule et Mathias Germain

(1) V. M. Corman *et al., Euro Surveill., 25,* 2000045, 2020.

SURVEILLER L'ÉPIDÉMIE À TRAVERS LES EAUX USÉES

Et si l'analyse des eaux usées pouvait déterminer l'ampleur de l'épidémie ? Certes, le SARS-CoV-2 s'attaque en premier aux voies respiratoires mais, chez 10 % des personnes infectées, il provoque des syndromes intestinaux. L'équipe du microbiologiste Gertjan Medema, de l'institut de recherche sur l'eau, aux Pays-Bas, a ainsi identifié la présence de traces de SARS-CoV-2 dans des prélèvements d'eaux usées qui provenaient de six villes et un d'un aéroport (1). *« Cette surveillance n'est pas nouvelle, elle est notamment pratiquée en France pour les virus responsables de gastro-entérites,* rappelle Christophe Gantzer, du laboratoire de chimie physique et microbiologie pour les matériaux et l'environnement de l'université de Lorraine. *Nous sommes impliqués dans un projet de ce type qui vient de démarrer : des prélèvements sont effectués à l'entrée des stations de traitement de différentes villes françaises. Nous suivons ainsi des villes où l'épidémie est à son point culminant, et d'autres où elle est à un niveau plus faible. Nous cherchons à déterminer s'il y a une correspondance entre la quantité de virus trouvée dans les eaux usées et le niveau épidémique dans la population. »* L'objectif est de déterminer si cette surveillance peut servir d'indicateur précoce en cas de pic épidémique secondaire. **M. G.**



▲ *Le contrôle biologique des stations d'épuration pourrait alerter sur un possible pic épidémique.*

(1) G. Medema *et al., medRxiv,* doi:10.1101/2020.03.29.20045880, 2020.

MÜLLER/CHARITÉ – PEOPLE IMAGE STUDIO/SHUTTERSTOCK

Témoignages

Les chercheurs à l'heure du confinement

La fermeture des laboratoires a obligé les scientifiques à s'adapter. Occasion d'approfondir leurs travaux pour certains, mais danger pénalisant d'inactivité pour les étudiants en thèse et postdoctorat.

MARC PESCHANSKI,
biologiste, directeur de l'Institut I-Stem, à Corbeil-Essonnes

« Nous avons prêté main-forte à un hôpital »

Dès la semaine précédant le confinement, nous avons anticipé l'arrêt des activités du laboratoire. Les équipes ont pu stopper leurs travaux sans trop de précipitation, faire le tri dans les cultures de cellules, mettre à l'arrêt les gros équipements, comme la plateforme de criblage. L'essai clinique qui vise à implanter un patch de cellules dans la rétine de malades souffrant de rétinite pigmentaire *[*La Recherche *n° 546, avril 2019, p. 58]* a été suspendu : trop dangereux pour les patients et les équipes.

Mais le confinement ne signifie pas l'arrêt du travail scientifique ! Analyse de données, rédaction d'articles… Nous menons aussi des approfondissements scientifiques sur les thématiques dans lesquelles nous avons envie d'engager le laboratoire, comme les exosomes *[des vésicules larguées par les cellules dans leur environnement, NDLR]* ou l'intelligence artificielle. Nous avons même organisé des visioconférences en invitant des scientifiques extérieurs. Il faut profiter de cette période pour se cultiver !

Par ailleurs, nous avons pris des initiatives pour prêter main-forte au Centre hospitalier sud-francilien, à Corbeil-Essonnes – la pénurie de matériel et de réactifs pour la PCR nous a profondément choqués et nous avons très vite souhaité mettre les compétences du laboratoire au service de l'hôpital. Par ailleurs, une initiative d'une ingénieure du laboratoire, passionnée d'impression 3D, a permis de fabriquer des visières plastiques à l'aide de feuilles de PVC transparentes. Des volontaires participent à leur diffusion : plusieurs centaines de ces visières équipent des personnels hospitaliers, des éboueurs de l'agglomération d'Évry, des policiers municipaux… »

Propos recueillis par Mathias Germain

Retrouvez d'autres scientifiques qui témoignent des conséquences du confinement pour la recherche sur www.larecherche.fr

MARIE-HÉLÈNE VERLHAC,
biologiste, directrice du Centre interdisciplinaire de recherche en biologie du Collège de France, à Paris

« Préserver les lignées uniques »

Nous avons des rats, des souris, des poissons, des oiseaux et des mouches. Tous sont précieux pour nos recherches. Nous devons préserver les lignées d'animaux rares, par exemple des lignées de souris uniques au monde que l'on utilise pour l'étude de la formation des ovules, ou pour analyser l'implication de certains gènes dans la neurodégénérescence liée à l'âge. La création de ces rongeurs a nécessité plusieurs années de travaux, mais nous avons dû arrêter momentanément les croisements afin de réduire le nombre d'individus. Pour assurer le suivi et l'entretien des animaux, nous avons choisi les techniciens animaliers qui n'ont pas d'enfants de moins de 16 ans et qui ne dépendent pas des transports en commun. Nous pouvons aussi compter sur l'aide de chercheurs volontaires. »

Propos recueillis par M. G.

YVON JAILLAIS,
biologiste cellulaire et moléculaire, responsable d'une équipe au laboratoire reproduction et développement des plantes de l'ENS de Lyon

« Les plus touchés, ce sont les étudiants »

Les plus touchés sont les étudiants en thèse et les post-doctorants. Leurs contrats sont précaires. Les répercussions du confinement sur leur activité de recherche seront fortes. Des expériences stoppées pendant deux mois, et rien de nouveau relancé, peuvent résulter en une période d'inactivité de quatre, voire six mois. Considérable sur une thèse de trois ans ! Je pense aussi aux étudiants en master 2. Ils veulent pouvoir se présenter aux concours des écoles doctorales pour une thèse et n'auront qu'un stage de master 2 tronqué… En Allemagne, la Fondation pour la recherche prolonge de trois mois tous ses contrats courts. Je n'ai encore rien vu de rassurant à ce sujet en France de la part de l'Agence nationale de la recherche. »

Propos recueillis par Victoria Milhomme

BERTRAND DESPREZ - DR

Écologie

ESPÈCES ENVAHISSANTES CHARISMATIQUES

Une équipe internationale a mis en évidence que le charisme de certaines espèces envahissantes serait un atout non négligeable pour ces dernières (l'écureuil gris d'Amérique du Nord, par exemple). Il est pourtant peu considéré dans leur étude et leur gestion.

I. Jarić *et al., Front. Ecol. Environ.*, doi:10.1002/fee.2195, 2020.

1,95 À 2,04 MILLIONS D'ANNÉES

C'EST L'ÂGE de deux crânes de spécimens des genres *Homo* et *Paranthropus,* retrouvés dans la grotte de Drimolen, en Afrique du Sud. Cela suggère qu'ils ont vécu en même temps que leurs cousins australopithèques.

A. I. R. Herries *et al., Science, 368,* eaaw7293, 2020.

Paléontologie

NEANDERTAL AVAIT LA FIBRE

Le mythe d'un homme de Neandertal rustre, primitif, s'effondre un peu plus : une équipe internationale a mis au jour, en Ardèche, dans un espace connu pour n'avoir été occupé que par des Néandertaliens, un fragment de cordelette tressée (trois plis) datant d'il y a 41 000 à 52 000 ans.

B. L. Hardy *et al., Sci. Rep., 10,* 4889, 2020.

Paléoanthropologie

Les origines de Neandertal explorées à partir d'une dent

Une équipe internationale a analysé des protéines contenues dans l'émail dentaire d'un représentant européen du genre *Homo* vieux de plus de 800 000 ans.

L'étude de la biologie des espèces disparues se heurte à la physique : l'ADN se dégrade avec le temps. Des paléobiologistes de l'université de Copenhague, en collaboration avec d'autres institutions européennes, ont trouvé comment contourner l'obstacle : en analysant d'autres séquences du vivant, celle des protéines. Après avoir mis au point leur méthode sur une dent de rhinocéros de 1,77 million d'années (1), puis sur celle d'un ancêtre de l'orang-outan vieux de 1,9 million d'années (2), ils se sont attaqués à celle d'un humain. Et pas n'importe lequel : *Homo antecessor,* la plus ancienne espèce humaine découverte en Europe, qui a vécu voici 860 000 ans (3).

« *C'est fabuleux ! Je n'aurais jamais pensé qu'on pouvait analyser de la matière organique pour des périodes aussi anciennes,* reconnaît Amélie Viallet, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle. *C'est le fruit d'un long travail, ils ont mis quatre ans pour parvenir à ces résultats.* »

C'est aussi le produit d'un site exceptionnel, la Gran Dolina de la sierra d'Atapuerca, en Espagne.

Une branche sœur

Par des analyses protéomiques, notamment par le recours à la spectrométrie de masse, les biologistes ont étudié les protéines de l'émail de dent de l'un des six *Homo antecessor* répertoriés sur ce site. Grâce à un peptide bien connu de la médecine légale – car il existe sous deux formes, l'une portée par le chromosome X et l'autre par Y –, ils ont établi que l'individu était un homme.

Ils ont ensuite analysé les séquences de sept protéines, qu'ils ont comparées à celles prélevées chez d'autres représentants du genre *Homo* (*Sapiens, Neandertalis,* homme de Denisova) et chez des grands singes. Ils ont ainsi explicité la position d'*Homo antecessor* dans l'arbre du genre *Homo*. « *Ce n'est pas l'ancêtre commun des lignées* sapiens *et néandertalienne, mais plutôt une branche sœur* », analyse Amélie Viallet.

Partant de ce résultat, les auteurs supposent que certains caractères morphologiques inattendus d'*Homo antecessor,* comme la forme générale du visage présentant des traits plutôt fins similaires à ceux d'*Homo sapiens,* sont apparus chez les ancêtres des lignées humaines modernes et que la face large et prognathe de Neandertal résulte d'une dérive. « *On peut aussi imaginer que ces caractères proviennent d'une mécanique évolutive différente chez* sapiens, soutient Amélie Viallet. *En revanche, il semble clair qu'*Homo antecessor *constitue un ancêtre probable de la lignée néandertalienne. Il partage avec lui des traits morphologiques et vit au bon endroit.* » Difficile d'imaginer en effet une parenté directe avec *Homo sapiens,* qui a émergé en Afrique plus de 500 000 ans plus tard et ne semble pas avoir colonisé l'Europe avant 43 000 ans avant le présent.

Cette première analyse protéomique sur un ancien hominine constitue une rupture technologique. « *Ce sera intéressant d'appliquer cette technique à d'autres hominines anciens, afin d'élucider l'origine d'*Homo antecessor, note Amélie Viallet. *Mais cette méthode est invasive : pour analyser le protéome, il faut sacrifier le fossile de dent. Certains préféreront attendre que la technique gagne en maturité avant de l'essayer sur leur fossile.* »

Agnès Vernet

▲ *L'analyse protéomique de dents d'*Homo antecessor *constitue un exploit technique.*

(1) E. Cappellini *et al., Nature, 574,* 103, 2019.
(2) F. Welker *et al., Nature, 576,* 262, 2019.
(3) F. Welker *et al., Nature, 580,* 235, 2020.

PROF. JOSÉ MARÍA BERMÚDEZ DE CASTRO

Géologie

AU TEMPS OÙ IL FAISAIT 12 °C EN ANTARCTIQUE

L'Antarctique n'a pas toujours été une terre glaciale et inhospitalière. Il y a des dizaines de millions d'années, le continent jouissait d'un climat tempéré et abritait des populations de dinosaures et des forêts humides similaires à celles que l'on trouve aujourd'hui en Nouvelle-Zélande. Comment de tels écosystèmes ont-ils prospéré si près du pôle Sud, où le soleil ne se lève pas pendant plusieurs mois chaque année ? Pour répondre à cette question, une équipe internationale a mis au jour un pan de sol forestier figé sous la glace, à seulement 900 km du pôle, contenant une variété de végétaux fossilisés datant du Crétacé, il y a 90 millions d'années environ (1). L'analyse de ces fossiles par tomodensitométrie a révélé la présence de pollen, de spores et d'un réseau dense de racines en si parfait état de conservation que les chercheurs pouvaient y distinguer des structures cellulaires. Une telle végétation suggère que la température annuelle moyenne en Antarctique avoisinait alors 12 °C et que le continent n'était pas du tout couvert de glace. Or, cela implique que le climat terrestre était globalement plus chaud qu'on ne l'estimait durant le Crétacé, période qui a connu les températures les plus élevées de ces dernières 140 millions d'années, avec une moyenne annuelle de 35 °C aux tropiques, et un niveau de la mer supérieur de 170 m à celui d'aujourd'hui.

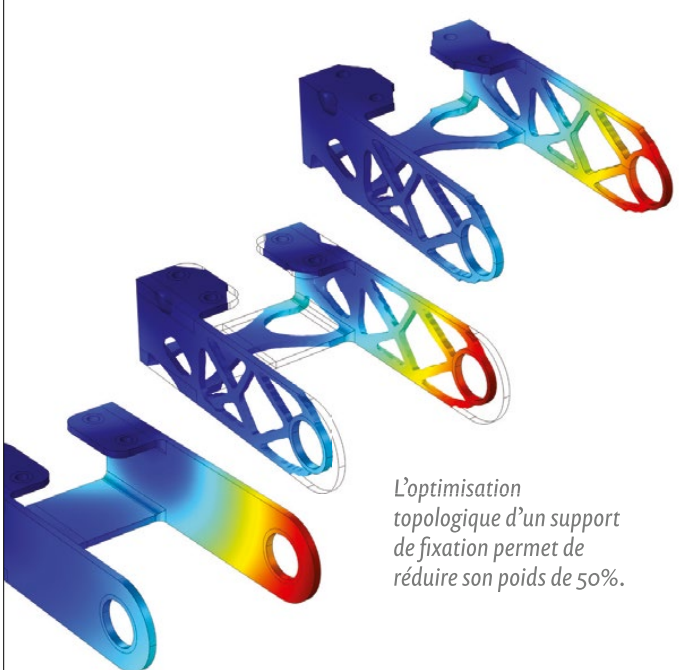
Ces nouvelles données bouleversent les modèles climatiques du passé. *« Pour qu'un tel climat soit possible, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère devait se situer entre 1120 et 1680 parties par million (ppm), soit bien plus que les 1000 ppm estimées jusqu'à présent,* explique Howard Falcon-Lang, paléontologue à l'université de Londres. *Aujourd'hui, à titre de comparaison, l'air contient 415 ppm de CO_2 et chaque année s'y ajoutent 2,3 ppm. »*

William Rowe-Pirra

▲ *Ce tableau reconstitue la forêt humide qui recouvrait une région située à 900 km du pôle Sud à l'époque du Crétacé, il y a 90 millions d'années environ.*

(1) J. P. Klages *et al., Nature, 580,* 7801, 2020.

Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



L'optimisation topologique d'un support de fixation permet de réduire son poids de 50%.

Cela dépend des objectifs de conception. Les méthodes d'optimisation topologique permettent de trouver la meilleure version possible d'une structure pour un usage spécifique. Un support peut être optimisé pour un seul type de chargement, tandis qu'un autre est optimisé pour huit. La fonctionnalité Density Model simplifie le processus d'optimisation topologique pour les ingénieurs en calcul de structure.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour l'optimisation topologique.

comsol.blog/density-topology

COMSOL

ALFRED-WEGENER-INSTITUT/JAMES MCKAY

Informatique

IA DARWINIENNE

Partant d'un ensemble d'opérations élémentaires, une IA de Google génère au hasard 100 algorithmes et ne conserve que les plus performants. Leurs codes sont copiés et subissent à leur tour des mutations aléatoires. Le système s'auto-améliore ainsi, génération après génération.

H. Liu *et al.*, arXiv.org/abs/2004.02967, 2020.

10 HEURES

C'EST LE TEMPS qu'il faut à l'enzyme de la jeune pousse française Carbios pour dégrader 90 % d'un bout de plastique PET, utilisé pour fabriquer les bouteilles. La libération d'acides par cette enzyme permet ensuite de recycler le plastique.

V. Tournier *et al.*, *Nature, 580,* 216, 2020.

Biologie

GROSSESSE MASCULINE

Chez les hippocampes, ce sont les mâles qui portent la progéniture en développement. Cette évolution a été possible grâce à une modification de leur système immunitaire, notamment ce qu'on appelle l'immunité adaptative. C'est ce que suggèrent des analyses de leur génome.

O. Roth *et al.*, *PNAS,* doi:10.1073/pnas.1916251117, 2020.

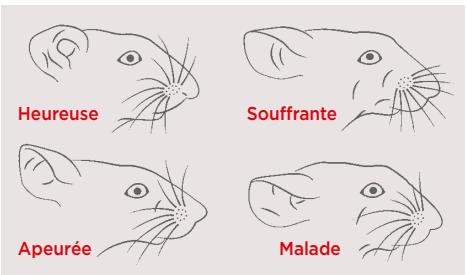
Neurosciences

Cet algorithme qui peut lire les émotions des souris

Grâce à un algorithme de reconnaissance faciale, des neurobiologistes ont identifié chez la souris cinq attitudes correspondant à autant d'émotions.

Dans *L'Expression des émotions chez l'homme et les animaux* (1872), Charles Darwin s'intéressait aux expressions faciales et aux émotions qu'elles reflètent. Mais comment se persuader que l'étincelle dans le regard du chat qui reçoit sa pâtée correspond à une émotion ? Une option consiste à observer l'expression faciale d'animaux face à des substances plus ou moins agréables. *« Cette approche manque d'objectivité, l'expérimentateur étant soumis à toutes sortes de biais »,* estime Benoît Girard, neuroscientifique à l'université de Genève. Des neurobiologistes allemands ont trouvé la parade. Ils ont mis au point un algorithme capable de reconnaître de façon objective l'expression faciale de souris soumises à des stimuli émotionnels (1). En pratique, les rongeurs, dont la tête est immobilisée, sont soumis à différents stimuli (eau sucrée, salée…) pendant qu'une caméra enregistre leur expression faciale.

Les images sont ensuite soumises à un algorithme d'apprentissage non supervisé, c'est-à-dire sans connaissance préalable, qui les classe selon leur degré de similitude. Cinq groupes d'expressions faciales ont ainsi été identifiés, réagissant à cinq stimuli distincts. Comment s'assurer alors qu'il s'agit de réactions émotionnelles et pas de mouvements réflexes ? *« Selon les auteurs, ces réponses ont les caractéristiques centrales des émotions telles que nous les avons décrites avec Ralph Adolphs,* explique David Anderson, directeur de recherche à Caltech, aux États-Unis. *Notamment la persistance, la valence, l'évolutivité et la flexibilité. »* En effet, l'expression du visage perdure après le stimulus, diffère selon sa valence, selon l'état interne (souris assoiffée ou repue), et peut varier à la suite d'un apprentissage. Reste à déterminer la fonction de ces expressions faciales. *« Cette étude apporte un nouvel outil pour explorer cette question »,* conclut David Anderson. **Gautier Cariou**



▲ *Les réactions ont été filmées, puis décryptées.*

(1) N. Dolensek *et al.*, *Science, 368,* 89, 2020.

Neurobiologie

Plus faim ? C'est (aussi) dans votre tête

La sensation de satiété ressentie après un bon repas serait liée au changement de forme de certaines cellules cérébrales sous l'influence du glucose.

Dès les années 2000, des études chez la souris ont montré l'existence d'une plasticité des connexions entre les neurones des circuits contrôlant l'appétit (1). En conditions extrêmes (obésité induite, hormonothérapie) ou non physiologiques (jeûne, suralimentation), la quantité de synapses qui relient ces neurones se modifie drastiquement, incitant à adapter la prise alimentaire. Créer ou supprimer des synapses ayant un coût énergétique non négligeable : un tel remodelage est-il impliqué à l'échelle, beaucoup plus brève, du repas ? C'est la question à laquelle ont voulu répondre Alexandre Benani, chargé de recherche CNRS à l'université de Bourgogne, et son équipe (2).

Les chercheurs se sont intéressés, chez la souris, aux neurones dits POMC, dont l'activation supprime l'appétit. Grâce à des techniques d'imagerie et d'enregistrement de l'activité

JULIA KUHL

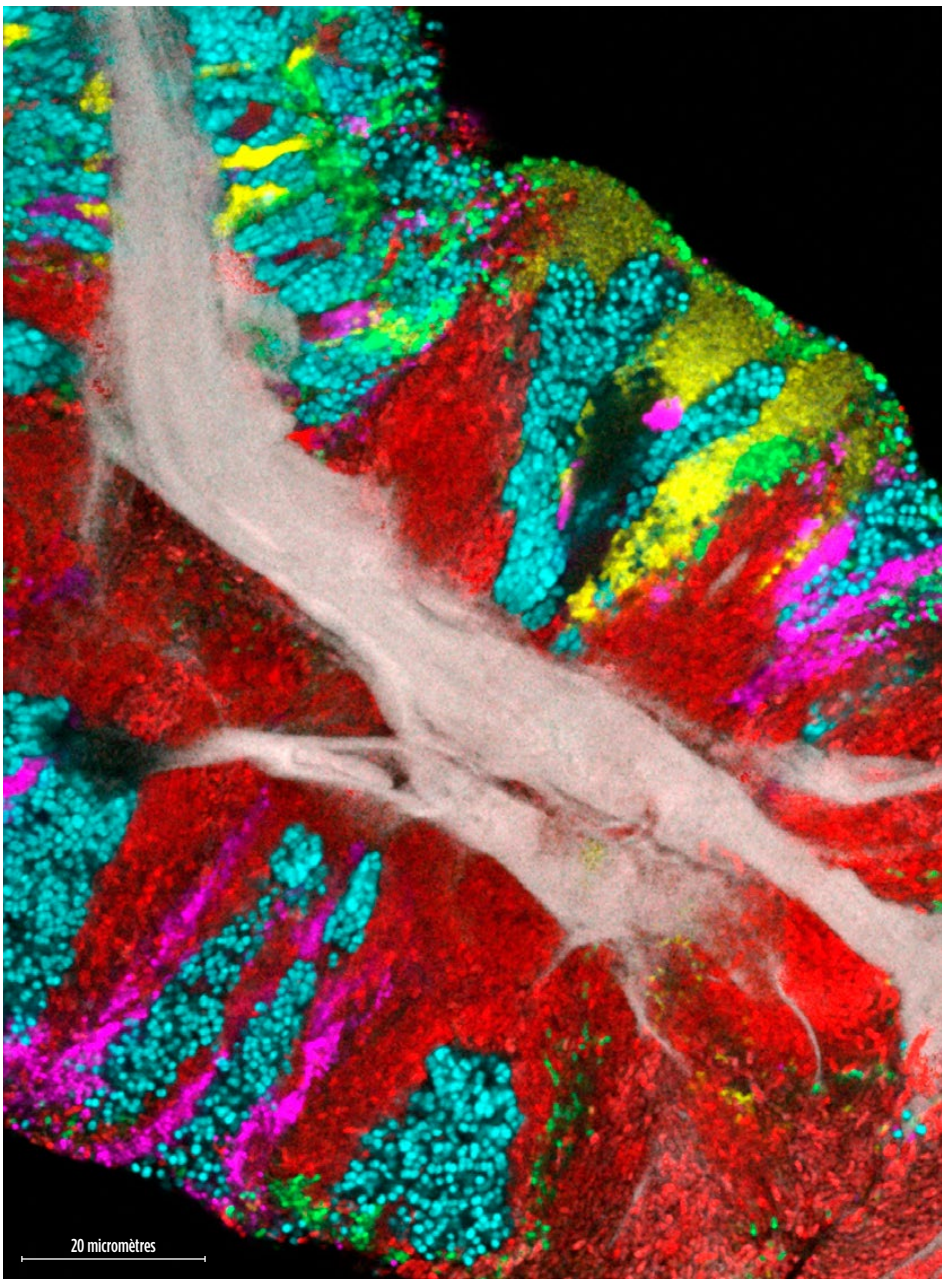
neuronale, ils ont constaté que les POMC sont effectivement activés après une prise alimentaire, sans qu'il y ait de modification du nombre ou de la nature des branchements entre eux. Il n'y aurait donc pas de plasticité synaptique à l'échelle du repas. En revanche, on sait depuis quelques années que les astrocytes, ces cellules en forme d'étoile qui ont des fonctions de support des neurones, peuvent agir sur la modulation de l'activité neuronale (3).

Le rôle des glucides

Au « repos », ces astrocytes enrobent les neurones POMC, formant une barrière physique et chimique, et agissant comme un frein sur leur activité. Mais à la suite du repas, les observations anatomiques montrent que les astrocytes se rétractent, levant l'inhibition sur les neurones POMC et provoquant un comportement de satiété. Deuxième découverte marquante, ce changement de morphologie se fait en réponse à l'augmentation de la glycémie. En effet, l'injection de glucose permet de provoquer cette rétraction, alors qu'un inhibiteur de l'absorption intestinale du glucose l'empêche.

Ce travail élégant, qui a pris près de cinq ans, a ainsi révélé une plasticité neuro-astrocytaire en conditions physiologiques et à l'échelle d'un repas, et donné des indications sur l'importance des glucides dans l'obtention de la satiété chez l'individu sain. **Aline Aurias**

(1) S. Pinto *et al., Science, 304,* 110, 2004.
(2) D. Nuzzaci *et al., Cell Rep., 30,* 3067, 2020.
(3) J. Clasadonte et V. Prévot, *Nat. Rev. Endocrinol., 14,* 25, 2018 ; C. Garcia-Caceres *et al., Nat. Neurosci., 22,* 7,2019.



STEVEN WILBERT AND GARY BORISY, THE FORSYTH INSTITUTE

Biologie

Écologie de la langue

Mystérieuse au premier regard, cette image en fluorescence multispectrale révèle la répartition de quelques-unes des 756 familles de bactéries vivant sur notre langue. Les *Actinomyces* (en rouge), par exemple, se rassemblent au centre de la langue ; ces bactéries participent à la transformation du nitrate en nitrite, que notre organisme convertit ensuite en oxyde nitrique pour dilater les vaisseaux sanguins. Les chercheurs ont analysé la langue de 14 femmes et 7 hommes, âgés de 21 à 74 ans, et constaté que la structure globale des communautés bactériennes reste similaire d'un participant à l'autre. Ce travail a ainsi permis de mieux connaître les systèmes d'écologie spatiale microbienne, leurs interactions, et la cohabitation avec leur hôte. **Valentin Faivre**

S. A. Wilbert *et al., Cell Rep., 30,* 4003, 2020.

Astronomie

PRÉCESSION RELATIVISTE

Le décalage relativiste de l'orbite d'une étoile à proximité du trou noir central de la Galaxie a été mesuré pour la première fois. Cette précession de l'orbite, conforme à la relativité générale d'Einstein, a pu être mise en évidence grâce au spectromètre Gravity.
Collaboration Gravity, *A&A, 636*, L5, 2020.

2 300 KM/H

C'EST LA VITESSE
des vents mesurés, pour la première fois, dans l'atmosphère d'une naine brune, intermédiaire entre une planète géante gazeuse et une étoile. Des vents deux fois plus rapides que sur Neptune, la planète la plus agitée du Système solaire.
K. N. Allers *et al.*, *Science, 368*, 169, 2020.

Physique

ASYMÉTRIE PARMI LES NEUTRINOS

Des résultats préliminaires de l'expérience T2K, au Japon, montrent que les comportements des neutrinos et de leurs antiparticules diffèrent. Le non-respect de cette « symétrie CP » est crucial pour comprendre pourquoi il y a plus de matière que d'antimatière dans l'Univers.
The T2K Collaboration, *Nature, 580*, 339, 2020.

Astronomie

L'origine d'Arrokoth expliquée par sa forme bilobée

Survolé le 1er janvier 2019 par la sonde New Horizons de la Nasa, cet objet de la ceinture de Kuiper compterait parmi les plus primitifs du Système solaire.

Circulant au-delà de l'orbite de Neptune, les objets de la ceinture de Kuiper, dits « transneptuniens », ont été découverts en 1992. Environ 3 000 d'entre eux sont pour l'instant connus, dont trois ont été survolés par la mission New Horizons de la Nasa : Pluton et son satellite Charon, le 14 juillet 2015, et (486958) Arrokoth, le 1er janvier 2019. En exploitant les données recueillies par la sonde lors son passage à 3 500 km de distance, une équipe internationale a pu analyser en détail les caractéristiques de ce dernier astre. Elle affirme, dans trois articles parus dans la revue *Science* (1), qu'il compte parmi les plus primitifs du Système solaire !

Considérée comme le principal réservoir des comètes à courte période, la ceinture de Kuiper porte les traces de son histoire mouvementée. Selon le modèle de Nice – le scénario privilégié par les astronomes pour décrire l'évolution du Système solaire –, elle aurait été, lorsqu'elle était âgée de 700 millions d'années, bouleversée, déplacée et vidée de 99 % de sa population par des perturbations dues au déplacement des planètes géantes. Sa structure actuelle résulterait de cet événement brutal, qui aurait positionné une partie de ses astres sur des orbites très allongées et fortement inclinées par rapport au plan de l'écliptique.

▲ *Arrokoth se caractérise par ses lobes lisses et ultra-rouges.*

Tel n'est pas le cas d'Arrokoth. Cet objet, composé de deux lobes accolés qui lui donnent une allure de cacahuète, tourne autour du Soleil en 293 ans sur un plan presque conforme à celui des planètes. Cela le classerait dans une sous-famille de transneptuniens dits classiques froids qui, du fait de leur éloignement, auraient été épargnés par ces chambardements et seraient demeurés dans leur région d'origine. Les collisions étant rares dans la zone où il circule – distante du Soleil de 42 à 46 unités astronomiques (distance Terre-Soleil) –, l'astre serait resté « gelé » dans un état quasi primordial. Est-ce vraiment conforme à la réalité ?

Matières organiques

C'est ce qu'ont voulu vérifier les scientifiques de la mission New Horizons en essayant de reconstituer les conditions de formation de ce corps céleste qui, outre le fait d'être le plus lointain jamais approché par une sonde, appartient à une gamme de transneptuniens de taille intermédiaire, presque indétectables depuis la Terre.

Ces chercheurs ont commencé par démontrer, en analysant des spectres d'absorption, que la couleur « ultra-rouge » d'Arrokoth s'explique, en partie, par la présence de matières organiques et de glaces de méthanol sur son sol. « *Ce composé étant stable dans un environnement très froid, cela confirme que cet objet a été formé dans une zone externe de la nébuleuse primitive qui a donné naissance au Système solaire* », explique Sonia Fornasier, maître de conférences à l'université de Paris et au Lesia-Observatoire de Paris. Puis ils ont étudié sa surface – étonnamment lisse au regard de celle du noyau beaucoup plus petit de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko observée par la sonde Rosetta –, et trouvé que, malgré un faible nombre de cratères, l'âge d'Arrokoth était supérieur

NEW HORIZONS PATH OF EXPLORATION/NASA

à 4 milliards d'années. Enfin, l'équipe a voulu comprendre comment cet astre avait pu acquérir une forme bilobée, dans cet environnement froid où l'érosion due à la sublimation des glaces par le Soleil est quasi inopérante.

Forces de marée

Les équateurs de ses deux lobes étant presque parfaitement alignés et le matériau poreux et fragile d'Arrokoth ne présentant aucune déformation au niveau du « cou », elle a privilégié le scénario d'une collision à faible vitesse entre deux corps préexistants. *« Des forces de marée sont susceptibles de créer ce type de rencontre "en douceur"*, note Gabriel Tobie, chercheur CNRS au laboratoire de planétologie et géodynamique à Nantes. *On sait qu'un satellite dont la période de révolution est inférieure à celle de rotation sur lui-même du corps auquel il est attaché se rapproche irrémédiablement de lui.* » Dans le cas d'Arrokoth, cela nécessite aussi que les deux constituants primaires aient préalablement, et à la suite de leurs captures réciproques, amorti leurs mouvements relatifs par des effets de dissipation d'énergie. Un phénomène réduit à l'heure actuelle. Mais qui était probablement courant, voici quatre milliards d'années, à l'époque où la ceinture de Kuiper était encore densément peuplée et riche en gaz. *« Environ un tiers des "classiques froids" sont des objets doubles »*, remarque à cet égard Sonia Fornasier.

Vahé Ter Minassian

(1) J. R. Spencer *et al.*, *Science, 367,* 998, 2020 ; W. M. Grundy *et al.*, *Science, 367,* 999, 2020 ; W. B. McKinnon *et al.*, *Science, 367,* 1000, 2020.

THIERRY MARRO

Les ressources de la démocratie

Les démocraties sont-elles aptes à répondre aux défis de la lutte contre le réchauffement climatique ? Cette question hante le débat public depuis quelques années, et le traitement de la crise du Covid-19 dans différents pays ravive le sujet. La démocratie serait disqualifiée pour plusieurs raisons, notamment son impuissance à prendre en compte le temps long – celui du climat –, alors que les cycles électoraux valorisent des résultats de court terme. Elle est aussi critiquée parce que les décisions remettant en cause des modes de vie ancrés dans l'imaginaire collectif – réduire l'usage de la voiture, par exemple – y sont difficiles à prendre. Enfin, elle semble échouer à protéger les intérêts de ceux qui ne votent pas – les plus jeunes et les générations futures.

Une dictature verte, éclairée, serait-elle susceptible de prendre des décisions plus conformes aux impératifs environnementaux ? Rien n'est moins sûr. Qui peut croire qu'un petit groupe d'humains doté de pouvoirs absolus fera passer l'intérêt général et le bien commun devant ses intérêts propres, à rebours de ce qui a été observé dans bien des despotismes ? On peut aussi douter de sa capacité à imposer des mesures douloureuses : dans un contexte de raréfaction des ressources essentielles (énergie, matériaux), il peut devenir difficile de contrôler les populations à grande échelle.

AU VU DE L'AMPLEUR des transformations à réaliser, une lutte efficace contre le réchauffement doit impliquer l'ensemble de notre société. Cela suppose que les populations considèrent comme légitimes ces efforts et y adhèrent. Seule leur participation accrue à la gestion des affaires de la cité est susceptible d'y parvenir. Pour que l'action collective soit conforme à nos objectifs climatiques, il est essentiel de faire évoluer la manière dont sont prises les décisions politiques. La contrainte climatique doit être intégrée à notre cadre institutionnel, car elle conditionne l'ensemble de nos activités. Se fixer des règles de rang constitutionnel, imposant par exemple la compatibilité de l'usage des fonds publics avec l'accord de Paris sur le climat, pourrait rendre plus intangible cet engagement. Cela s'inscrirait pleinement dans nos valeurs fondamentales. Ainsi, dégrader l'environnement qui permet notre existence et notre bien-être est une atteinte à la liberté assurée par la Déclaration des droits de l'homme. Il est temps de la protéger !

La connaissance des faits scientifiques doit également être un préalable à toute décision politique. Pour les gouvernants, cela suppose qu'ils soient formés et qu'ils aient accès à ces savoirs, par exemple en étant appuyés par des conseils scientifiques – et quand c'est le cas, comme à la présidence des États-Unis, il faut aussi qu'ils les écoutent… Pour les citoyens, c'est un effort de médiation scientifique et de développement de leur capacité à s'approprier ces sujets qu'il faut mener. Il reste aussi à élaborer une offre politique à la hauteur du défi. À partir d'un cadre de contraintes clairement posé, les partis politiques pourraient se prêter à l'exercice de livrer leur vision de notre société. Sur fond de limites indépassables, des propositions contrastées peuvent émerger, traduisant des conceptions distinctes du rôle de l'État, de l'autonomie individuelle… Lorsque nous serons sortis de la crise actuelle, il ne faudra pas laisser flétrir notre démocratie : ayons l'audace de la renouveler. ■

> **“Se fixer des règles climatiques de rang constitutionnel”**

Marie Dégremont est chercheuse associée au Centre de sociologie des organisations à l'Institut d'études politiques de Paris.

▲ *Vue d'artiste représentant une étoile déchirée par un trou noir de masse intermédiaire, entouré d'un disque d'accrétion.*

Astrophysique

HUBBLE DÉTECTE UN POSSIBLE TROU NOIR

Comment se forment les trous noirs supermassifs, ces géants cosmiques situés au cœur des grosses galaxies ? Une équipe internationale d'astrophysiciens pourrait bien avoir trouvé la preuve solide du chaînon manquant dans l'évolution de ces corps célestes (1).

En 2006, une éruption de rayons X, hypothétiquement causée par la dislocation d'une étoile passée trop près d'un trou noir, a été détectée par les satellites XMM-Newton et Chandra. Surprise, la source de ce rayonnement ne se trouvait pas au centre d'une galaxie, où siègent habituellement les trous noirs supermassifs. Les scientifiques ont donc suggéré qu'il s'agissait de la manifestation d'un trou noir de masse intermédiaire.

Parce qu'ils sont plus petits et moins actifs, ces trous noirs sont très difficiles à détecter. Mais, en pointant le télescope Hubble vers la source du rayonnement, les astronomes ont confirmé que ce rayonnement provenait d'un objet d'environ 50 000 fois la taille du Soleil, situé dans un amas dense d'étoiles en périphérie d'une autre galaxie, et non d'une étoile à neutron de notre Voie lactée. *« Démontrer l'existence de tels trous noirs est très important,* explique Guillaume Dubus, astrophysicien à l'université Grenoble Alpes. *Cela nous permet d'affiner les modèles de croissance des trous noirs et des galaxies. »*

William Rowe-Pirra

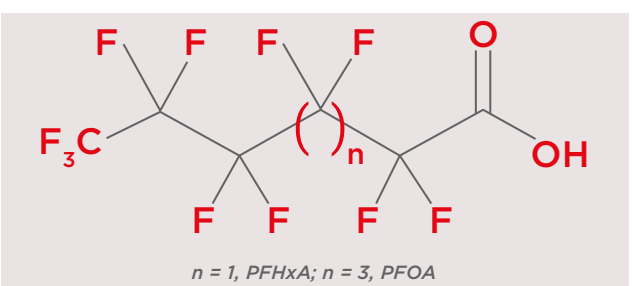
(1) D. Lin *et al., ApJL, 892, L25,* 2020.

Chimie

Un gel capable de piéger les « produits chimiques éternels »

Cette substance peut capter 80 % des PFAS, une classe de produits chimiques extrêmement résistants à la dégradation, dans de l'eau contaminée.

Dans *Dark Waters*, sorti au cinéma en février dernier, un avocat spécialisé dans la défense des industries chimiques vient en aide à un éleveur convaincu que ses vaches ont été empoisonnées par les rejets d'une usine voisine, propriété du puissant groupe de chimie DuPont. Le film est tiré d'une histoire vraie, et l'acide perfluorooctanoïque dont il est question fait partie d'une classe de produits chimiques, les composés alkyliques per- et polyfluorés (PFAS), extrêmement résistants à la dégradation – au point que certains chimistes les ont surnommés « produits chimiques éternels » – et potentiellement nocifs pour la santé. Des chimistes américains espèrent avoir trouvé un début de solution à ce problème en synthétisant un gel fluoré qui cible et capte ces substances de manière efficace (1).



▲ *La formule du gel fluoré mis au point par des chimistes américains.*

Les PFAS, très utilisés comme revêtement antiadhésif ou retardateur de flamme, sont connus pour avoir une forte affinité avec les groupes fluorés ; par ailleurs, ils contiennent une chaîne carbonée dont le groupe situé à l'extrémité est chargé négativement. Les chimistes ont donc synthétisé un produit dont les propriétés chimiques sont spécialement conçues pour piéger les PFAS : leur polymère est constitué d'un squelette fluoré et de composants chargés positivement, capables de se lier aux molécules de PFAS.

L'équipe a d'abord exposé de l'eau artificiellement enrichie en PFAS à ce gel, pendant vingt et une heures, selon deux scénarios : dans le premier, l'eau était très concentrée en PFAS à 50 microgrammes par litre (µg/L), et en gel à 100 milligrammes par litre (mg/L) ; dans le second, la proportion de PFAS (1 µg/L) et de gel (10 mg/L) était réduite. L'analyse des échantillons, réalisée grâce à la chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse, a montré que le polymère avait capté environ 80 % des PFAS, quel que soit le scénario. Les techniques actuelles, elles, n'en adsorbent que 30 % environ. Les chimistes ont ensuite vérifié l'efficacité de leur gel avec de l'eau recueillie sur un site pollué par les PFAS. Là encore, leur gel s'est montré très efficace : au bout de deux heures, il avait piégé 95 % de ces substances.

Vincent Glavieux

(1) E. Kumarasamy *et al., ACS Cent. Sci.,* doi : 10.1021/acscentsci.9b01224, 2020.

ESA/HUBBLE, M. KORNMESSER - FRANCK ALBERT LEIBFARTH

Mathématiques

La théorie ergodique sous les projecteurs

Gregory Margulis et Hillel Furstenberg viennent de se voir décerner le prix Abel 2020 pour leurs travaux pionniers mélangeant probabilités et algèbre.

Pandémie oblige, la cérémonie du prix Abel 2020, qui aurait dû se dérouler à Oslo ce mois-ci, est reportée. Ce sera donc l'an prochain, en mai 2021, que le Russo-Américain Gregory Margulis et l'Américano-Israélien Hillel Furstenberg se verront remettre par le roi de Norvège, avec le ou les lauréat(es) 2021, ce prix qui couronne une carrière de mathématicien. Cette année sont récompensés deux scientifiques qui ont marqué durablement le domaine de la théorie ergodique.

La théorie ergodique résulte d'un mélange de deux domaines des mathématiques : les systèmes dynamiques et les probabilités d'une part, et les groupes d'autre part. *« Les premières idées de mélange de ces domaines étaient antérieures, mais ils ont développé les outils qui, grâce aux marches aléatoires et aux probabilités, ont permis de décoincer énormément de problèmes de théorie des groupes »*, note Bertrand Rémy, professeur de mathématiques à l'École polytechnique. Que retenir de ces carrières de plus d'un demi-siècle ? Pour

GREGORY MARGULIS

1991 : professeur à l'université Yale.
2005 : Prix Wolf.

HILLEL FURSTENBERG

1965 : professeur à l'université hébraïque de Jérusalem.
2006 : Prix Wolf.

Margulis, un théorème s'impose : le théorème dit de « rigidité et d'arithméticité des sous-groupes discrets des groupes de Lie ». *« Utiliser la théorie des systèmes dynamiques pour démontrer un résultat d'algèbre fondamental, c'était révolutionnaire pour l'époque »*, commente Emmanuel Breuillard, professeur à Cambridge et ancien thésard de Margulis. Ce résultat, démontré en 1975, lui vaudra la médaille Fields en 1978. Grâce aux outils qu'il y développe, il prouvera ensuite des résultats de théorie des nombres, et il continuera à faire fructifier le domaine.

« Pour Furstenberg, ce qui me frappe, c'est son influence sur la communauté, avec une vingtaine d'étudiants en thèse qui sont devenus des mathématiciens de tout premier plan. À l'université de Jérusalem, où il a fait toute sa carrière, il a créé une école de mathématiques reconnue mondialement », juge Bertrand Rémy. Difficile de choisir un résultat… Peut-être sa démonstration du théorème de Szemerédi. Le Hongrois Endre Szemerédi (prix Abel 2012) avait démontré en 1975 un théorème sur des ensembles d'entiers à l'aide de méthodes combinatoires. *« C'était une démonstration très complexe, et Furstenberg en a fait une démonstration extraordinaire, basée sur des idées de récurrence dans les systèmes dynamiques qui apportait un point de vue différent et d'une grande clarté »*, raconte Emmanuel Breuillard. Une démonstration et des méthodes qui ont eu un destin mathématique riche aboutissant, en 2004, au théorème de Green-Tao (« La suite des nombres premiers contient des suites arithmétiques arbitrairement longues »).

Destins parallèles

La trajectoire de Gregory Margulis et Hillel Furstenberg, et leur héritage, font l'admiration de la communauté mathématique. Bien qu'œuvrant dans le même domaine, ils n'ont jamais travaillé ensemble directement. Tous deux ont souffert d'être juifs : les parents de Furstenberg ont fui l'Allemagne nazie en émigrant aux États-Unis ; Margulis, pur produit de l'école soviétique de mathématiques, a subi de plein fouet l'antisémitisme à partir de 1967. Si l'on devait trouver une différence de style mathématique entre les deux hommes ? *« Tous deux ont utilisé à fond les probabilités pour comprendre des problèmes d'algèbre, mais je dirais que Furstenberg l'a fait en ouvrant des voies que d'autres font fructifier, tandis que Margulis a clos d'une manière virtuose de nombreux problèmes fameux »*, conclut Emmanuel Breuillard. Un qui défriche et l'autre qui termine… Les destins parallèles se rencontrent. **Philippe Pajot**

DAN REZETTI - YOSEF ADEST, HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM

Écologie

BIODIVERSITÉ URBAINE

Le risque d'épidémie liée au passage de virus de l'animal à l'homme serait-il accentué par l'urbanisation et l'introduction d'espèces sauvages dans les villes ? La question divise les spécialistes.

« Plus les villes sont grandes, […] plus des espèces sauvages sont contraintes de vivre en milieu urbain, […] plus vite les vecteurs de propagation agissent. »

Jean-Christophe Fromantin, maire de Neuilly-sur-Seine, et **Didier Sicard,** épidémiologiste (*Le Monde*, 8 avril)

« Amalgamer […] interactions entre des êtres humains et non-humains et développement de nature dans les villes en une fallacieuse cause d'épizooties est un raccourci absurde […]. »

Un collectif de 13 chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle (*Le Monde*, 14 avril)

En bref

Médecine régénérative

RECONSTRUCTION APRÈS ABLATION

La jeune pousse lyonnaise HealShape veut exploiter les progrès de la bio-impression 3D pour la reconstruction mammaire destinée aux femmes ayant subi une mastectomie, dans le cadre du traitement d'un cancer. Une solution qui vise à détrôner l'implant mammaire. Ce projet est soutenu par Pulsalys, l'incubateur et accélérateur d'innovations « deep tech » de Lyon et Saint-Étienne.

■ healshape.com

Covid-19

L'IA DANS LA BATAILLE

Toutes sortes de compétences scientifiques et technologiques se sont mobilisées dans la bataille contre la pandémie de Covid-19. Dès le 3 mars, la jeune pousse parisienne Iktos annonçait une collaboration avec le laboratoire californien SRI International pour accélérer la découverte d'antiviraux. Iktos met au point des outils reposant sur l'apprentissage profond capables de concevoir des molécules sur cahier des charges, tandis que le laboratoire privé californien dispose d'une plateforme robotisée de synthèse chimique.

■ iktos.ai

Médecine préventive

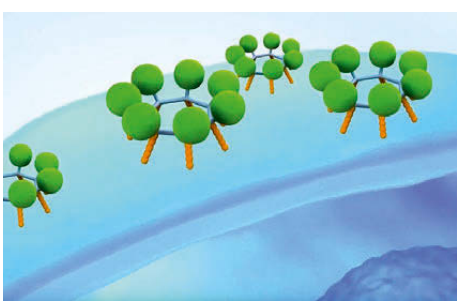
OSIVAX prépare un vaccin universel contre la grippe saisonnière

Ce vaccin provoque une réaction du système immunitaire contre une protéine interne présente dans toutes les souches du virus de la grippe.

L'actualité du coronavirus souligne que la recherche de nouveaux vaccins est une entreprise de longue haleine. La grippe saisonnière provoque en moyenne de l'ordre d'un demi-million de décès par an dans le monde, quelque 10 000 en France. De nouveaux vaccins sont proposés chaque année, mais leur efficacité varie car le virus ne cesse de muter et il n'est pas aisé de prévoir quelles souches feront des ravages. Chaque nouveau vaccin est donc un pari… pas toujours gagnant. La jeune pousse lyonnaise Osivax travaille à la mise au point d'un vaccin universel contre la grippe, efficace contre toutes les variantes du virus.

« Les vaccins classiques provoquent une réaction immunitaire contre des glycoprotéines présentes à la surface du virus, qui changent avec chaque mutation, **explique Alexandre Le Vert, le président-fondateur d'Osivax.** ***Notre OVX836 mobilise des lymphocytes T (CD8) contre une protéine interne qui protège l'ARN du virus et n'est pas modifiée à chaque mutation. »*** **Après des études précliniques concluantes et un essai clinique de phase I qui a permis de vérifier l'innocuité de son candidat vaccin, Osivax a entamé en décembre dernier une étude clinique de phase II sur 300 volontaires, qui doit permettre de vérifier s'il provoque une réponse immunitaire efficace.** Pierre Vandeginste

■ www.osivax.com



▲ *L'étude clinique actuellement menée par Osivax doit montrer si son vaccin est efficace.*

Informatique neuromorphique

GRAI MATTER LABS lance une puce ad hoc pour l'IA embarquée

Avec ses 196 « cœurs neuronaux », cette puce « neuromorphique » simule plus de 200 000 neurones interconnectés, tout en étant réactive et sobre.

Contrairement à ce que la formule « réseau de neurones » semble indiquer, leur mise en œuvre ne repose nullement sur une électronique mimant l'architecture du cerveau, avec ses neurones individuels interconnectés physiquement via des myriades de synapses. En fait, ils sont simulés par des logiciels souvent exécutés sur des ordinateurs classiques, avec une efficacité… médiocre. Les processeurs graphiques, puces conçues pour manipuler efficacement des images grâce à un parallélisme élevé, améliorent nettement cette efficacité. Puis sont arrivées les premières puces ad hoc, dites neuromorphiques : IBM a annoncé sa puce TrueNorth en 2014, et Intel sa Loihi en 2017. Mais de nombreuses start-up sont également dans la course.

GrAI Matter Labs (GML), installée à Paris, à Eindhoven, aux Pays-Bas, et à San José,

■ Créée en mai 2016
■ Effectif : 40
■ Levée de fonds : 12,5 M€ en avril 2018

OSIVAX

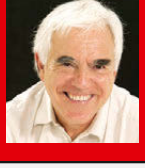
aux États-Unis, s'est appuyée sur des travaux menés à l'Institut de la vision (Sorbonne Université, Inserm, CNRS) pour mettre au point GrAI One, dont la production vient de démarrer. *« Notre approche repose sur un fonctionnement asynchrone,* explique Rémi Poittevin, responsable de la R&D pour les systèmes d'intelligence artificielle et les applications. *Au lieu de recalculer cycliquement les valeurs de tous les neurones, on ne calcule l'état de chaque neurone que lorsque la valeur de ses entrées change. Cela permet d'obtenir à la fois un temps de réaction très court et une consommation d'énergie réduite.* » La puce ne consomme en effet que 35 MW lorsqu'elle est cadencée à 25 MHz.

Circuits spécialisés

GrAI One vise les applications embarquées de l'intelligence artificielle, qui doivent rester sobres, comme le véhicule autonome ou les objets connectés, alimentés par batterie. Cette puce comporte une grille de 196 « neuron cores » interconnectés. Il ne s'agit pas de processeurs, capables d'exécuter un jeu d'instructions généralistes, mais de circuits spécialisés, dotés d'une mémoire locale, capables de calculer l'état de 1024 neurones chacun. La puce peut donc simuler plus de 200 000 neurones. Cette première puce de GML occupe 20 mm² de silicium et est gravée dans une technologie 28 nm. Des caractéristiques encore modestes, qui permettent d'envisager de nouvelles générations bien plus puissantes. **P.V.**

■ www.graimatterlabs.ai

INRIA / C.TOURNIAIRE



Le vote électronique, progrès ou danger ?

Voter est un acte fondamental de la démocratie. Mais il n'a de sens que si le processus de vote est rigoureux et certifié du début à la fin. Pour nos scrutins nationaux, les méthodes sont éprouvées : bulletin sous enveloppe, urnes, preuves d'identité, isoloirs, assesseurs, transmission sécurisée des résultats… C'est lourd et les fraudes, quoique possibles, restent limitées dans leur ampleur. Mais les votes par correspondance, comme ceux des résidents à l'étranger, sont difficiles à rendre sûrs. Le vote électronique recouvre le vote par Internet (par exemple, depuis l'étranger) et les « machines électroniques » dans les bureaux de vote. Ce sont des ordinateurs déguisés, dont les problèmes récurrents montrent qu'ils sont loin d'avoir les qualités requises. À cause de trous de sécurité fréquents, les ordinateurs, les réseaux ou les interfaces homme-machine peuvent être attaqués de l'extérieur. Le logiciel peut aussi avoir des bugs, ce que j'ai vu à l'œuvre pour les élections d'une académie prestigieuse.

Plusieurs pays, dont l'Allemagne, ont banni les machines après essais (1), et la France a abandonné le vote par Internet pour les Français à l'étranger. Cependant la Suisse, où les votes sont légion et l'exigence de rigueur légendaire, a décidé de prendre la question au sérieux. La Poste suisse et l'entreprise Scytl ont développé un système très élaboré, soumis à analyse publique partielle en 2019. Une faille majeure y a cependant été trouvée par des chercheurs – le secret du code paie rarement.

UNE QUESTION s'impose donc : peut-on faire des machines et logiciels de vote sûrs, et pour quel type de vote ? Les critères ne sont pas différents de ceux des votes papier. Il faut d'abord que les inscrits existent, qu'eux seuls puissent voter, que leurs votes soient garantis secrets et qu'ils ne puissent pas vendre leurs votes, en prouvant à un tiers ce qu'il est. Après le scrutin, chacun doit pouvoir vérifier que son bulletin a bien été pris en compte tel quel et pour exactement une voix, qu'aucun faux bulletin n'a été introduit et que le comptage final est juste. Les élections papier actuelles ne s'en sortent pas mal, mais sans tout garantir, comme on le voit lors de bourrage et de disparitions d'urnes, ou encore de difficultés de recomptage.

Plusieurs logiciels de vote ont été mis au point par les chercheurs et industriels. Parmi eux, le système Belenios, du Loria à Nancy, possède beaucoup de qualités. Il préserve le secret grâce au chiffrement homomorphe qui permet d'additionner les votes chiffrés sans jamais les déchiffrer, garantit la validité des bulletins, et permet à chacun de vérifier la bonne prise en compte de son vote et le comptage final. Le tout sans autorité unique centralisée. Ses logiciels sont ouverts et librement analysables. Ses algorithmes sont prouvés

> **“Le problème reste ouvert pour des élections générales”**

corrects par vérification mathématique sur ordinateur, ce qui donne des garanties fortes. Belenios est utilisé par des organismes de recherche, dont l'Académie des sciences pour ses élections de membres. Mais le vote se faisant par Internet, son identification reste limitée et son interface web attaquable, et la vente de vote y est possible. S'il est très bien adapté aux élections en milieu fermé, il ne peut pas être utilisé pour des élections générales, pour lesquelles le problème reste largement ouvert, et scientifiquement dur. ■

(1) En France, une soixantaine de communes utilisent les machines à voter, mais un moratoire en vigueur depuis 2008 interdit leur mise en place dans de nouvelles localités.

Gérard Berry est professeur émérite au Collège de France, membre de l'Académie des sciences, médaille d'or 2014 du CNRS.
● Cette chronique est proposée en alternance avec celle de Serge Abiteboul, de l'ENS Paris et Inria.

Physique des particules
APRÈS LE BOSON DE HIGGS

Le 4 juillet 2012 est une date importante dans l'histoire de la physique, avec l'annonce de la découverte du boson de Higgs. Il était le dernier constituant – jusqu'alors inobservé – du modèle standard de la physique des particules, la théorie la plus aboutie dont les scientifiques disposent pour décrire **le monde de l'infiniment petit**. Élaboré progressivement depuis plus de soixante ans, il décrit les particules élémentaires de matière (les quarks et les leptons), ainsi que les bosons, qui transmettent les forces fondamentales : l'électromagnétisme, qui maintient par exemple les électrons autour du noyau des atomes ; l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux et permet leur fusion au cœur des étoiles ; et enfin l'interaction faible, responsable du phénomène de radioactivité. Le modèle standard est surtout une théorie quantique où les particules sont les vibrations élémentaires de champs continus qui s'étendent partout dans l'espace, comme une vague est une vibration de la surface d'un océan. Le boson de Higgs, en particulier, est la manifestation du champ du même nom. C'est en interagissant avec ce dernier que les autres particules acquièrent leur masse. Un mécanisme crucial, prédit dès les années 1960 et dont la validation a été apportée par la découverte de 2012, à l'aide du plus grand accélérateur de particules au monde, le LHC (*). Une consécration pour le modèle standard.

Cependant, **l'histoire n'est pas finie**. Des nuages voilent le ciel de cette belle théorie et laissent présager l'existence, au loin, d'une nouvelle physique qui engloberait ce modèle. L'effervescence, voire l'impatience, est telle que la détection d'un signal anormal au LHC, en 2016, a déclenché une avalanche d'articles théoriques pour expliquer cette observation, qui s'est révélée être une fluctuation statistique. D'un point de vue expérimental, les accélérateurs de particules, tel le LHC, restent des instruments de recherche privilégiés. **L'une des priorités consiste à mesurer plus précisément les propriétés du boson de Higgs**, à la recherche d'éventuelles déviations par rapport au modèle standard, comme l'explique Ursula Bassler, présidente du Conseil du Cern. En Europe, les scientifiques du domaine réfléchissent à la stratégie à adopter pour mener cette recherche, avec de nouveaux accélérateurs ou d'autres expériences centrées par exemple sur les neutrinos ou la détection directe de matière noire. D'un point de vue théorique, une multitude de propositions existent pour dépasser le modèle standard : supersymétrie, dimensions supplémentaires, modèles composites… Mais aucun indice n'est venu accréditer l'une ou l'autre hypothèse. Les théoriciens ont aujourd'hui tendance à se détacher le plus possible des grandes théories hypothétiques pour se concentrer sur **la modélisation des signatures expérimentales observables dans les détecteurs**. Si nul ne sait aujourd'hui à quoi ressemblera la nouvelle physique, tous espèrent en retirer une meilleure description du monde qui nous entoure, voire des pistes pour réconcilier la gravitation avec la physique des particules. Mais ceci est une autre histoire ! ■

(*) **Le LHC,** ou Grand collisionneur de hadrons, est situé sous la frontière franco-suisse, près de Genève. Il est administré par le Cern (l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire), laboratoire européen pour la physique des particules.

PAGE 38
Les territoires connus de la physique des particules

PAGE 40
Au-delà du modèle standard

PAGE 44
Entretien avec Ursula Bassler, physicienne des particules

PAGE 48
Un chemin entre théorie et expérience

CERN/MAXIMILIEN BRICE

▲ *L'expérience CMS (de 15 m de haut et 21 m de long) est l'un des détecteurs du LHC qui a découvert le boson de Higgs, grâce à la collaboration de milliers de scientifiques et techniciens. Le LHC et les détecteurs sont actuellement en phase d'amélioration pour traquer la physique au-delà du modèle standard.*

1

Les territoires connus de la physique des particules

Cette carte esquisse de façon imagée les contours du monde des particules élémentaires, dont certaines s'assemblent dans les atomes. Les interactions fondamentales sont symbolisées par des flèches (les champs quantiques associés aux particules ne sont pas représentés). Ces particules élémentaires et ces interactions forment le modèle standard. Mais ce modèle n'est pas complet. Quelles terres existe-t-il au-delà ?

● ○ **Première famille de particules (compose la matière courante)**

▲ △ **Deuxième famille de particules (plus massive et instable que la première)**

■ □ **Troisième famille de particules (encore plus massive et instable)**

Vers l'hémisphère des antiparticules

Les antiparticules sont les jumelles des particules, mais possèdent une charge électrique opposée.

▲ **Les leptons** regroupent trois particules chargées électriquement (l'électron, le muon, le tau), chacune associée à une particule neutre (le neutrino). Ces neutrinos ne ressentent que l'interaction faible.

▲ **Les quarks** existent sous six « saveurs » différentes. Avec les leptons, ils constituent les fermions. Les quarks sont sensibles à l'interaction forte et ne s'observent jamais isolément.

▲ **Les hadrons** sont composites : ils contiennent d'autres particules, des quarks et des gluons. Par exemple, un proton contient deux quarks hauts et un quark bas. Il existe beaucoup de hadrons.

▲ **Les atomes,** assemblages de protons, neutrons et électrons, forment le monde macroscopique et la matière qui nous entoure.

▲ **Les bosons** transmettent les interactions fondamentales. Les gluons et les bosons faibles, vecteurs respectifs des interactions forte et faible, interagissent avec eux-mêmes.

▲ **Le boson de Higgs** est la base d'un mécanisme donnant leur masse aux particules élémentaires, dont lui-même. Exceptions : le photon, les gluons et les neutrinos, qui n'ont pas de masse dans le modèle standard.

Texte : *Sylvain Guilbaud*
Infographie : *Bruno Bourgeois*

2

Au-delà du modèle standard

Cédric Delaunay, CNRS

Notre compréhension actuelle des interactions fondamentales entre particules élémentaires, couronnée par la découverte du boson de Higgs en 2012, est excellente. Mais plusieurs observations et quelques interrogations théoriques suggèrent qu'il se cache quelque chose au-delà du modèle standard de la physique des particules.

PHYSICIEN
Cédric Delaunay est chargé de recherche au CNRS, chercheur en physique des particules au laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique. Il est spécialiste de la construction de théories au-delà du modèle standard.

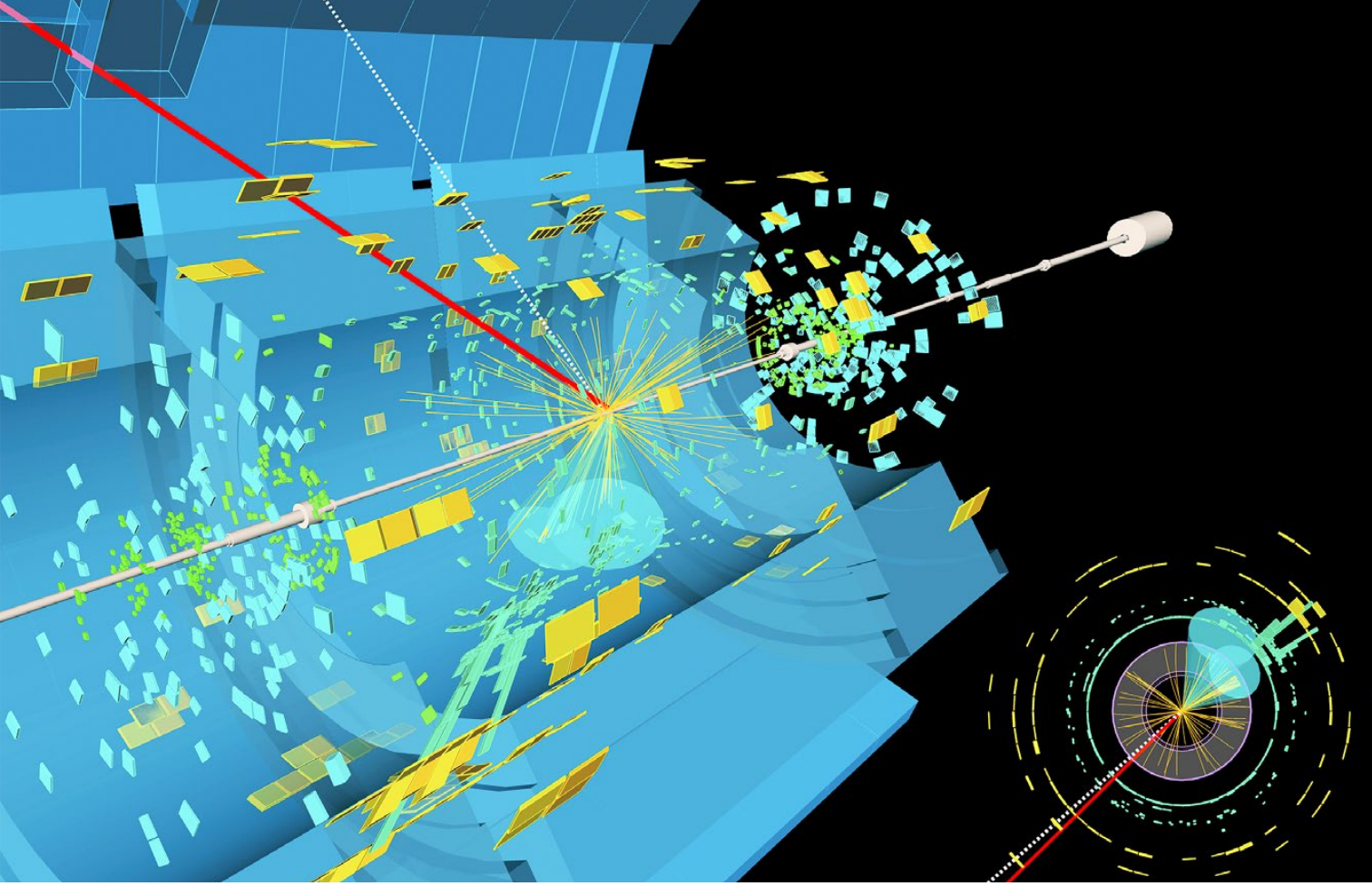
Le boson de Higgs est très certainement la particule la plus importante du modèle standard. Elle est la clé de voûte d'un mécanisme inventé dans les années 1960 par les physiciens Robert Brout, François Englert et Peter Higgs afin d'expliquer la masse des particules élémentaires. Selon ce mécanisme, il existe, partout dans l'Univers, un « fluide » baptisé champ de Higgs. Comme la lumière voit sa vitesse réduite lors de sa propagation dans un milieu dense, les particules sont ralenties par leurs interactions avec le champ de Higgs, acquérant de facto une masse. Le modèle standard prédit que ce dernier n'est pas infiniment rigide. Il « vibre » et « sonne » : il s'y propage des ondes, dont le boson de Higgs est le grain d'énergie élémentaire. En 2012, sa découverte a grandement consolidé cette intuition. D'une part, les propriétés du nouveau boson coïncident – dans la marge d'erreur expérimentale – avec les prédictions du modèle standard. D'autre part, sa masse, qui n'est pas déterminée par la théorie, a une valeur singulière. Mesurée à environ 125 fois celle du proton, elle est proche d'une valeur critique qui permet au modèle standard de continuer à décrire, du moins en principe, les trois forces fondamentales (l'électromagnétisme, et les forces nucléaires forte et faible) jusqu'à des énergies très élevées, voire jusqu'à l'énergie de Planck, environ 10^{19} gigaélectronvolts, soit 10 milliards de milliards de fois plus élevée que l'énergie de masse du proton. Si le modèle standard pouvait ainsi tout décrire, il n'y aurait plus rien à découvrir en physique des particules – hormis l'intégration de la gravitation, qui n'est plus négligeable à l'échelle de Planck.

Contexte **Le modèle standard est la théorie quantique des champs qui décrit les trois forces fondamentales régissant le comportement des particules élémentaires à l'échelle microscopique : l'électromagnétisme, et les forces nucléaires forte et faible. Cette théorie est en accord remarquable avec l'expérience. Mais ce n'est pas le fin mot de l'histoire.**

Une théorie incomplète

Pourtant, sans même évoquer la gravitation, nous savons que le modèle standard n'est pas une théorie complète des interactions fondamentales. Il est notamment mis en défaut par plusieurs observations. La première concerne les neutrinos. Ces particules très légères et dépourvues de charge électrique sont seulement sensibles à la force nucléaire faible et peuvent ainsi se propager quasi librement – sans interagir – sur de très grandes distances. Il existe trois types (ou « saveurs ») de neutrinos, que l'on associe respectivement à l'électron, au muon et au lepton tau. Plusieurs expériences ont montré que les neutrinos changent de saveur au cours de leur propagation. Ce phénomène

DR



▲ *Dans cette observation de l'expérience Atlas au LHC, un boson de Higgs se désintègre en deux quarks bottom.*

n'est possible que s'ils possèdent des masses différentes. Or, dans le modèle standard, les neutrinos n'interagissent pas avec le champ de Higgs et ne devraient pas avoir de masse. Si leur masse n'est pas nulle, c'est que quelque chose manque au modèle standard.

Deuxième observation problématique : la présence de matière noire dans l'Univers. Il s'agirait d'une forme de matière transparente, environ cinq fois plus abondante que la matière ordinaire et interagissant très peu avec celle-ci. Son existence se déduit seulement indirectement à travers son influence gravitationnelle. Dans une galaxie, elle permet d'expliquer la grande vitesse de rotation de ses étoiles. Elle joue également un rôle déterminant dans la formation des structures de la matière dans l'Univers, tels les amas et superamas de galaxies ; elle laisse une empreinte caractéristique observée dans le spectre des photons du fond diffus cosmologique, ce rayonnement qui baigne l'Univers depuis son émission, environ 380 000 ans après le Big Bang. Dans le cadre du modèle standard, seuls les neutrinos pourraient tenir le rôle de la mystérieuse matière noire sur la scène cosmique. Néanmoins, diverses contraintes limitent leur contribution à seulement quelques pour cent de la quantité de matière noire estimée.

Enfin, le monde qui nous entoure est constitué de matière. Cette observation triviale est en réalité un casse-tête théorique. Chaque particule de matière possède un double, une antiparticule, de même masse mais de charges, notamment électriques, opposées. Particule et antiparticule sont indissociables, comme les deux faces d'une même pièce. Elles sont créées et disparaissent ensemble. Une fraction de seconde après le Big Bang, l'Univers était un plasma extrêmement chaud et dense, formé vraisemblablement d'autant de particules que d'antiparticules.

125

FOIS ENVIRON la masse du proton : c'est la valeur mesurée de la masse du boson de Higgs.

Comment l'antimatière a-t-elle pu disparaître sans emporter toute la matière avec elle ? Une asymétrie entre matière et antimatière a dû se développer relativement tôt dans l'histoire de l'Univers. Une asymétrie d'environ un milliard et une particules pour chaque milliard d'antiparticules. Or le modèle standard ne permet pas d'expliquer une asymétrie si importante : il est nécessaire de dépasser la théorie actuelle pour expliquer l'origine de la matière.

Ces trois observations laissent malheureusement peu d'indices sur la nature de cette nouvelle physique. Surtout, il n'est pas improbable qu'elle inclut des particules inconnues de masses très élevées. Par exemple, la faible masse des neutrinos pourrait résulter de leurs interactions avec des neutrinos stériles extrêmement lourds, environ mille milliards de fois plus massifs que le boson de Higgs. Ces hypothétiques particules auraient pu également produire la matière •••

CERN

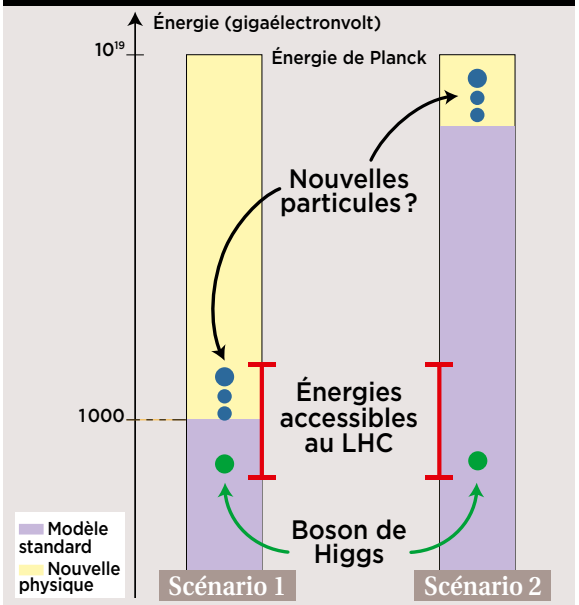
••• en quantité, à une époque où elles peuplaient encore l'Univers primordial. Outre ces aspects pratiques, l'existence de ces particules est motivée par les hypothétiques théories de grande unification, qui uniraient l'électromagnétisme et les forces nucléaires forte et faible en une seule et même force à très haute énergie. La technologie actuelle des accélérateurs est encore largement insuffisante pour observer directement des particules aussi massives (lire p. 44).

Par ailleurs, un scénario où la validité du modèle standard s'étendrait jusqu'à ces très hautes énergies pose une sévère interrogation théorique, qui prend racine dans le champ de Higgs et réside dans le fait que, en théorie quantique des champs, le vide fluctue. Des paires de particule-antiparticule y apparaissent et disparaissent spontanément, en permanence. Au cours de leur éphémère existence, ces fluctuations du vide interagissent avec les autres particules, en modifiant ainsi les propriétés par rapport à la théorie classique.

Par exemple, en électromagnétisme classique, le champ électrique produit par une charge ponctuelle décroît inversement au carré de la distance. Dans la théorie quantique, la situation diffère. Des paires électron-positron sont produites dans le vide qui se comporte alors comme un milieu diélectrique (*). Sous l'influence du champ électrique de la charge ponctuelle initiale, le positron est attiré alors que l'électron est repoussé, ce qui masque partiellement la charge initiale. Celle-ci, mesurée à grande distance, est alors la somme d'une charge intrinsèque et d'une correction quantique, provenant des fluctuations du vide. Cette correction a la particularité d'être proportionnelle à la charge intrinsèque, ce qui permet de l'interpréter comme une modification non pas de la charge, mais de la force électromagnétique qu'elle induit. Cette propriété essentielle découle d'une loi de conservation empêchant la création ou la destruction de charge électrique par les fluctuations du vide (lire l'encadré ci-contre).

De façon similaire, le champ de Higgs est sensible aux fluctuations du vide. La correction qu'elles induisent n'est cependant pas proportionnelle à la valeur classique du champ de Higgs : les fluctuations du vide contribuent proportionnellement à leur masse. Ce champ est alors déterminé par la masse de la particule la plus lourde avec laquelle il est en contact. S'il existait des particules beaucoup plus massives encore inconnues, le champ de Higgs serait donc fortement déstabilisé par leurs fluctuations quantiques. En effet, contrairement à la charge électrique, il n'est pas protégé par une loi de conservation dans le modèle standard.

Fig. 1 Deux scénarios pour la nouvelle physique



▲ **Dans le scénario 1, les nouvelles particules se trouvent à des énergies accessibles expérimentalement dans des accélérateurs. Elles expliqueraient « naturellement » la valeur du champ de Higgs. Dans le scénario 2, la nouvelle physique n'apparaît qu'à très haute énergie, ce qui pose un problème théorique, dit problème de hiérarchie.**

(*) **Un milieu diélectrique** est un milieu isolant dont les charges électriques répondent à l'action d'un champ électrique extérieur de manière à réduire ce champ dans le milieu.

Questions de stabilité

Cette instabilité constitue le problème de « hiérarchie » du modèle standard (Fig. 1). L'énergie du champ de Higgs mesurée expérimentalement est relativement faible, environ 250 fois l'énergie de masse du proton. Si l'hypothèse selon laquelle le modèle standard est valide jusqu'à des énergies plus élevées, voire jusqu'à l'énergie de Planck, était juste, l'énergie du champ de Higgs devrait être beaucoup plus importante. Néanmoins, on peut retrouver la valeur mesurée expérimentalement en ajustant artificiellement la valeur classique du champ de Higgs de manière à compenser la majeure partie des corrections quantiques. Dans le cas extrême où le champ de Higgs interagit avec une nouvelle particule proche de l'échelle de Planck, les deux contributions devront s'annuler jusqu'à la 32e décimale pour rester en accord avec l'observation !

Une annulation aussi miraculeuse ne peut pas être exclue a priori, mais elle est scientifiquement intenable. Comment le champ de Higgs peut-il être aussi intimement lié à d'autres phénomènes physiques, d'autant plus s'ils se manifestent à beaucoup plus haute énergie ? À l'évidence, une physique inconnue œuvre à la stabilisation du champ de Higgs.

Le modèle standard renferme un autre problème de stabilité, tapi dans les entrailles de la théorie décrivant la force nucléaire forte : la chromodynamique quantique. Dans cette théorie, le vide n'est pas défini de manière unique, mais il existe une infinité dénombrable d'états dont l'énergie est nulle. Ces derniers ne sont pas équivalents pour autant. Il est en effet

Le problème de hiérarchie, comme celui de « CP fort », renferme un paradoxe

INFOGRAPHIE : M. MARCONVILLE

impossible de passer d'un état à un autre par déformation continue des champs, comme une sphère ne peut être transformée en tore sans être trouée. On dit que ces états du vide sont topologiquement distincts. Le véritable vide quantique est alors une superposition de ces différents états. Il y a une infinité de superpositions possibles, selon la valeur d'un paramètre angulaire appelé ϑ_{QCD}. Sa valeur – comprise entre 0 et 2π – n'est pas connue a priori. Si ϑ_{QCD} était différent de 0, la force nucléaire forte serait différente pour les quarks et les antiquarks, ce qui permettrait au neutron de se comporter comme un dipôle électrique (*). Or un tel dipôle n'a jamais été observé dans la nature. S'il n'est pas nul, il doit être minuscule, ce qui, fondamentalement, implique que ϑ_{QCD} n'excède pas un milliardième de l'unité. Problème : ce paramètre est également influencé par la façon dont le champ de Higgs interagit avec les quarks. Si la contribution des quarks est beaucoup plus importante qu'un milliardième de l'unité, alors ϑ_{QCD} doit être finement ajusté de manière à compenser cette correction.

Cet ajustement constitue le problème de « CP fort » du modèle standard. Comme le problème de hiérarchie, il pose un paradoxe. Comment le vide de la chromodynamique quantique peut-il être aussi intimement lié à la façon dont les quarks interagissent avec le champ de Higgs, alors que ce dernier n'est pas sensible à la force nucléaire forte ? Ici encore, vraisemblablement, une physique inconnue est responsable du minuscule dipôle électrique du neutron.

Pistes et indices

La description actuelle de la physique des particules soulève encore d'autres énigmes qui trouvent probablement une explication dans une théorie plus fondamentale. La matière qui nous entoure est essentiellement composée d'électrons, de quarks hauts et bas, et de neutrinos électroniques. Il existe pourtant deux autres copies plus massives de cette famille de particules (voir p. 38). Quelle est la raison de cette réplication de la matière et pourquoi n'observe-t-on que trois familles ? Leur rôle nous est encore largement inconnu.

En outre, le mécanisme de Higgs confère des masses très différentes aux particules. Par exemple, l'électron est environ 1 000 fois plus léger que le lepton tau, lui-même 100 fois plus léger que le quark top. Pourquoi l'électron, comme la plupart des particules de matière, du reste, interagit-il si peu avec le champ de Higgs ? Et même si celui-ci est bel et bien responsable de la masse des particules élémentaires, nous ne savons rien de son origine. Les équations du modèle standard permettent l'existence du champ de Higgs, mais ne le requièrent pas a priori. Il y est simplement introduit de manière ad hoc.

Le modèle standard est donc loin de signer la fin de notre quête dans la compréhension du comportement intime de la matière. Nombre d'indices plaident en faveur d'une nouvelle physique à découvrir. Pour tous les problèmes évoqués, plusieurs pistes théoriques existent. Par exemple, la stabilité du champ de Higgs peut être assurée grâce à une nouvelle symétrie au-delà du modèle standard. Diverses approches sont envisageables. La plus économique imagine le champ de Higgs comme un champ composite dont les constituants sont liés entre eux par une nouvelle force. D'autres, plus radicales, nécessitent de revoir notre conception de l'espace et du temps. Soit en postulant l'existence de dimensions spatiales supplémentaires qui seraient invisibles à notre échelle, car repliées sur elles-mêmes. Soit en introduisant une nouvelle symétrie de l'espace-temps, appelée supersymétrie, impliquant l'existence de nouvelles particules. Il existe sûrement d'autres pistes (lire p. 48).

Mais, quelle qu'en soit la cause, la stabilité du champ de Higgs suggère l'existence d'une nouvelle physique à une énergie « seulement » 1 000 à 10 000 fois supérieure à la masse du proton. C'est précisément le domaine d'exploration du LHC et de ses éventuels successeurs. Nous espérons y découvrir les éléments de réponse au problème posé par la découverte du boson de Higgs. Et peut-être lever le voile sur les autres mystères du modèle standard. ■

(*) Un dipôle électrique est un système globalement neutre électriquement, mais dont les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas, induisant ainsi un champ électrique non nul.

SYMÉTRIES ET LOIS DE CONSERVATION

Une symétrie désigne l'invariance d'une loi physique lorsque certaines transformations sont appliquées sur les objets qu'elle décrit. Les symétries jouent un rôle essentiel en physique théorique. Il existe notamment un théorème, que l'on doit à Emmy Noether, qui établit qu'à chaque symétrie sous l'action d'un groupe de transformations déterminées par des paramètres continus (comme des rotations ou des translations) est associée une loi de conservation.

Par exemple, l'invariance des lois physiques par translation dans le temps implique la conservation de l'énergie. Autre exemple, en mécanique quantique, la théorie de l'électron est inchangée lorsque la phase de sa fonction d'onde est modifiée. En conséquence, la charge électrique est conservée par les interactions électromagnétiques. Cette loi de conservation implique également que l'électron est stable. Il ne peut pas se désintégrer, étant déjà la particule chargée la plus légère. Le modèle standard présente d'autres symétries, notamment associées aux forces nucléaires faible et forte, mais aucune ne s'applique au champ de Higgs. C. D.

3

Entretien avec **Ursula Bassler**

Conseil du Cern

« Le boson de Higgs, portail vers une nouvelle physique »

Au Cern, auprès de l'accélérateur de particules LHC, plus de 14 000 physiciens, ingénieurs et techniciens font fonctionner des détecteurs géants et analysent leurs données pour traquer les secrets de l'infiniment petit. Leur priorité : mieux cerner les propriétés du boson de Higgs. Ils cherchent aussi les signaux d'une physique au-delà du modèle standard. Pour cela, de nouveaux projets sont à l'étude.

La Recherche **Pouvez-vous nous décrire le fonctionnement du LHC ?**

Ursula Bassler Le LHC, ou Grand collisionneur de hadrons, produit des interactions entre des protons ou, parfois, des ions de plomb, à très haute énergie. Au départ, les protons sont extraits à partir d'une simple bonbonne d'hydrogène. Ils circulent d'abord dans des pré-accélérateurs, où des champs électriques accroissent leur vitesse, donc leur énergie. Puis ces protons sont injectés dans le LHC proprement dit, où des milliers d'aimants courbent leur trajectoire afin qu'ils suivent un tunnel circulaire de 27 km de circonférence, à 100 m sous terre. L'énergie des protons est alors de 6,5 TeV (*). Les protons sont répartis en deux faisceaux, constitués chacun de quelque 2 800 paquets d'une centaine de milliards de protons, qui se propagent en sens inverse. Lorsque ces faisceaux se croisent en quatre points d'interaction, de l'ordre d'un milliard de collisions par seconde sont produites. Les points d'interaction sont bardés de détecteurs – des expériences – qui enregistrent les informations recueillies lors des collisions.

Quelles sont ces expériences que vous évoquez ?

Ce sont Atlas, CMS, LHCb et Alice. Leur point commun est qu'elles mesurent les particules produites lors des collisions. Il est important de noter qu'il ne s'agit pas de débris, de morceaux de particules initiales. Lors d'une collision, l'énergie se transforme, littéralement, en d'autres particules, mesurées par les détecteurs. LHCb est une expérience dédiée à l'étude d'événements où apparaissent des quarks lourds, en particulier le quark b (bottom), d'où le nom de l'expérience (lire p. 48). Alice est particulièrement adaptée à l'étude des collisions des ions de plomb qui ont lieu pendant quatre semaines par an au LHC et qui visent à recréer un plasma de quarks et de gluons tel qu'il aurait existé au début de l'Univers. Enfin, Atlas et CMS sont les deux expériences généralistes du LHC. C'est grâce à elles que nous avons découvert le boson de Higgs.

Comment s'est faite cette découverte ?

On n'observe pas directement un boson de Higgs. Cette particule

(*) **L'électronvolt (eV)** est une unité correspondant à l'énergie d'un électron mis en mouvement par une tension électrique d'un volt. Cette unité est aussi utilisée pour décrire la masse des particules, car masse et énergie sont des quantités équivalentes.

Contexte **Afin d'étudier les phénomènes qui se produisent à l'échelle des particules élémentaires, le LHC (pour Large Hadron Collider) accélère des protons aux plus hautes énergies actuellement accessibles en laboratoire. Situé au Cern, à la frontière franco-suisse, c'est la plus grande infrastructure de recherche jamais construite, qui a permis de découvrir le boson de Higgs.**

URSULA BASSLER

PHYSICIENNE DES PARTICULES, Ursula Bassler est présidente du Conseil du Cern depuis le 1er janvier 2019.

– comme d'autres – n'est pas stable et se désintègre extrêmement rapidement en particules mesurables dans les détecteurs : des photons, des électrons, des muons… Cela permet de reconstruire ce qui s'est produit au moment de la collision et de rechercher des signatures caractéristiques des différents processus. En 2012, au moment de la découverte du boson de Higgs, les deux signatures caractéristiques observées consistaient en quatre leptons, des électrons ou des muons, ou deux photons. Ces signaux expérimentaux ont montré un excès autour d'une masse d'environ 125 GeV. L'accumulation de données a fourni ensuite la certitude qu'il s'agissait bien d'une nouvelle particule neutre possédant un spin nul – compatible avec les propriétés prédites pour le boson de Higgs. Cette accumulation de données est un point essentiel de la recherche en physique des particules.

Pour quelles raisons faut-il accumuler ainsi les données ?

Il faut par exemple déterminer si les signatures que l'on observe sont dues à une nouvelle particule ou, au contraire, à des phénomènes déjà connus, qui peuvent avoir des signatures identiques dans les détecteurs. On dit qu'il faut différencier statistiquement le « signal » du « bruit de fond ». Avec un milliard de collisions par seconde au LHC, seulement un boson de Higgs est produit environ toutes les secondes. L'accumulation de données permet d'observer et d'étudier des modes de production et de désintégration du boson de Higgs de plus en plus rares. Par ailleurs, nous simulons sur ordinateur ce que la théorie prédit que nous devrions observer dans les expériences. Grâce à des techniques d'apprentissage automatique *(machine learning)*, nous comparons ensuite ces simulations aux observations. L'ensemble de ces démarches permet d'attester une découverte comme celle du boson de Higgs et de connaître ses propriétés physiques.

1 MILLIARD

DE COLLISIONS par seconde environ sont produites au LHC, mais seulement un boson de Higgs est produit toutes les secondes en moyenne.

Pourquoi la découverte de cette particule a-t-elle eu un tel retentissement ?

Il y a deux raisons principales. D'abord, il s'agissait de la dernière particule prédite par le modèle standard. Elle joue un rôle particulier car ses interactions avec les autres particules se font en fonction de la masse de celles-ci. C'est très différent des autres interactions du modèle standard (l'électromagnétisme, les interactions faible et forte), qui dépendent de charges quantifiées, comme la charge électrique pour l'électromagnétisme. La seconde raison réside dans le fait qu'il s'agit de la première observation d'une particule scalaire, c'est-à-dire de spin nul. Or un champ scalaire joue un rôle important dans beaucoup de scénarios théoriques sur •••

PIERRE VASSAL/HAYTHAM-REA

••• les premiers instants de l'Univers. Au moment du Big Bang, le champ de Higgs avait une valeur nulle – comme les autres champs liés à des particules. Lorsque l'Univers s'est refroidi, une transition de phase a eu lieu, pendant laquelle le champ de Higgs a évolué vers une valeur non nulle. C'est pour cela que les particules qui interagissent avec le champ de Higgs acquièrent une masse. La valeur particulière du champ fait que nous vivons aujourd'hui dans un Univers métastable – autrement dit, l'Univers pourrait effectuer une nouvelle transition vers une valeur encore plus basse. La nature de cette transition de phase a influencé l'évolution de l'Univers. Ainsi, des fluctuations lors de la phase d'inflation (*) pourraient avoir donné naissance à des trous noirs primordiaux. Étudier les propriétés du boson de Higgs offre donc des pistes pour mieux comprendre la cosmologie.

On espérait voir au LHC des signes de physique au-delà du modèle standard, mais rien de tel n'a été découvert jusqu'à présent. Qu'est-ce qui a été recherché avec cet accélérateur depuis 2012?

Nous savons en effet que notre théorie actuelle n'est pas complète (lire p. 40) et le LHC nous offre un champ de recherche très vaste. D'un côté, la recherche directe d'une physique au-delà du modèle standard: des particules de matière noire, des particules supersymétriques ou des dimensions supplémentaires de l'espace-temps… Aucune de ces pistes n'a abouti pour le moment (lire p. 48). De l'autre côté, nous effectuons des mesures de grande précision sur des processus particuliers, connus dans le modèle standard, pour toujours mieux comprendre cette théorie, et pour être à l'affût de déviations entre l'expérience et les prédictions qui dévoileraient des phénomènes inconnus. Un exemple, crucial, consiste à mesurer les propriétés du boson de Higgs.

Nous ne connaissons donc pas tout de cette particule?

Non! Depuis 2012, nous avons étudié l'intensité avec laquelle elle interagit avec d'autres particules – ce que nous appelons les couplages. Les couplages du boson de Higgs ont été mesurés pour les bosons W et Z, et les fermions de la troisième famille: les quarks top, bottom, le tau. Actuellement, les expériences s'attellent à explorer la deuxième famille et les premières limites existent pour le muon. Comme les couplages varient proportionnellement à la masse de ces particules – comme prévu dans le modèle standard –, il est plus difficile, voire impossible pour le moment, de les mesurer pour les particules légères de la première famille, tel l'électron. Ensuite, les valeurs des couplages sont déterminées à ce jour avec une précision d'environ 10 % pour le couplage aux bosons Z et W, 20 % pour les quarks bottom et top, et 30 % pour le lepton tau. Or des effets au-delà du modèle standard pourraient modifier ces valeurs à une échelle en dessous du pour cent. Enfin, le boson de Higgs se couple aussi avec lui-même. Il se donne lui-même sa masse et cet autocouplage est très sensible à des effets de physique au-delà du modèle standard. Le boson de Higgs pourrait être un portail vers une nouvelle physique. Il faut donc absolument améliorer la précision de toutes ces mesures! Beaucoup sera déjà fait avec le LHC dans les années qui viennent, mais il faut se préparer à aller plus loin.

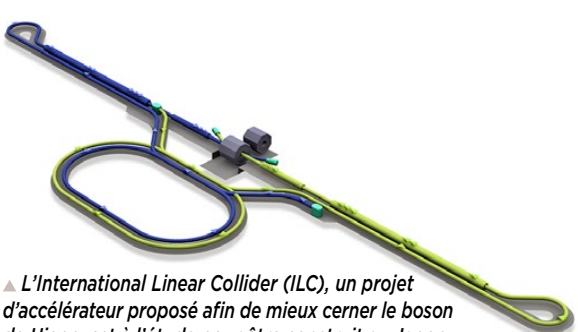
Le LHC est justement à l'arrêt pour travaux depuis fin 2018. Quelle sera la suite?

Des travaux de maintenance et d'amélioration des détecteurs sont en cours. L'objectif principal des travaux est d'augmenter la capacité des expériences, en particulier de LHCb et d'Alice, et de préparer la hausse de luminosité du LHC. La luminosité est une mesure du taux de collisions. D'ici 2025, la quantité de données récoltées sera multipliée par deux par rapport à celle accumulée jusqu'en 2018. Puis il y aura un nouvel arrêt vers 2025 pour mettre en place le projet LHC à haute luminosité (HL-LHC). Le

(*) **L'inflation** est une phase hypothétique du développement de l'Univers primordial, où ce dernier aurait subi une expansion gigantesque (un facteur 10^{26}).

UNE RECHERCHE MONDIALE

Près de 10 000 scientifiques du monde entier travaillent en lien avec le LHC. Le Cern, où il est situé, est fondé sur le modèle d'une organisation internationale: des pays membres signent une convention qui les engage notamment à un financement sur le long terme. Aujourd'hui, le Cern compte 23 pays membres, tous situés sur le continent européen, à l'exception d'Israël. Ils financent la majorité de l'infrastructure des accélérateurs (la construction et l'entretien du LHC, par exemple). En revanche, les expériences (CMS, Atlas, Alice, LHCb) sont des collaborations scientifiques internationales indépendantes du Cern, même si ce dernier sert de « hub » pour les accueillir. Des pays non-membres du Cern (les États-Unis par exemple) sont très présents dans ces collaborations, mais ils participent relativement peu au financement de l'infrastructure. L'exploration de la physique des particules ne se limite pas à l'utilisation de grands accélérateurs: il y a les recherches sur les neutrinos, des tentatives de détection directe de matière noire… là encore grâce à des collaborations internationales. S. G.



L'International Linear Collider (ILC), un projet d'accélérateur proposé afin de mieux cerner le boson de Higgs, est à l'étude pour être construit au Japon.

ILC

LHC fonctionnera alors jusqu'à la fin des années 2030 et la quantité de données sera encore multipliée par 10. À l'heure actuelle, les travaux ont été stoppés à cause de la pandémie de Covid-19. Ce qui était prévu au départ était un redémarrage du LHC en juin 2021.

En quoi consiste le LHC à haute luminosité ?

Les aimants quadripolaires en amont des quatre points de croisement vont être changés pour focaliser davantage les faisceaux de protons, donc augmenter le nombre de collisions. Pour la première fois, des électroaimants supraconducteurs *[le courant électrique s'y déplace sans perte, NDLR]* en niobium-étain, dont le champ magnétique atteindra 11 teslas, seront utilisés, contre 8 teslas pour les aimants supraconducteurs en niobium-titane utilisés aujourd'hui. L'orientation des paquets au moment des croisements va aussi être modifiée – par des « cavités radiofréquence en crabe » – afin de maximiser le nombre de collisions. Par ailleurs, les expériences vont considérablement renouveler leurs détecteurs. Et des méthodes d'analyse, des logiciels, des algorithmes sont aussi en train d'être conçus pour traiter un volume de données dont nous estimons qu'il sera 100 fois plus important.

Que se passera-t-il après l'arrêt du LHC, à partir des années 2040 ?

La communauté réfléchit à cela, dans le cadre de la mise à jour de la stratégie européenne, processus qui a lieu tous les six à sept ans. Quelles sont les questions de physique auxquelles nous voulons répondre en priorité ? Quelles machines construire pour s'y attaquer ? La priorité scientifique est de cerner avec la plus grande précision possible les propriétés du boson de Higgs. Des projets « d'usines à Higgs » sont esquissés : des collisionneurs d'électrons et de leur antiparticule, les positrons. À la différence du LHC, où les constituants des protons (quarks et gluons) se percutent avec une part variable de l'énergie totale des protons, les électrons et les positrons sont des particules élémentaires, et l'énergie de la collision correspond donc à leur énergie totale. Cela permet des mesures plus « propres ». Ces collisionneurs peuvent être linéaires ou circulaires : contrairement à une géométrie circulaire, un accélérateur linéaire n'est pas limité à haute énergie par le rayonnement synchrotron (*), mais il accumule moins de statistique à basse énergie. Un tel projet, l'International Linear Collider (ILC), est à l'étude depuis longtemps pour être construit au Japon, mais le gouvernement du pays n'a toujours pas rendu sa décision. Au Cern, le Compact Linear Collider (Clic) a été élaboré avec une technologie différente. Un projet de collisionneur circulaire au Cern a également été imaginé : le Future Circular Collider (FCC) prévoit un tunnel de 100 km qui hébergerait dans une première phase un collisionneur électron-positron. Les scientifiques chinois proposent un projet similaire, le Circular Electron Positron Collider (CEPC). Il a été soumis à un appel à projets de grandes infrastructures chinoises, mais aucune réponse n'a encore été donnée.

Quels autres projets sont d'ores et déjà envisagés ?

Un deuxième but scientifique est l'exploration de la physique aux plus hautes énergies, domaine dans lequel l'Europe est leader. Pour cela, le tunnel de 100 km pourrait accueillir, à terme, un collisionneur hadronique, le FCC-hh. Un tel projet nécessite le développement de nouvelles technologies, en particulier d'aimants dont les champs magnétiques sont très intenses, si possible avec des technologies supraconductrices à haute température critique. Les temps associés à ces développements et leur industrialisation seront longs ; on parle du milieu du siècle. Une continuation similaire du CEPC est proposée aussi en Chine. Par ailleurs, de nouveaux concepts tels que des collisionneurs de muons ou l'accélération par laser-plasma sont proposés, mais les développements pour un collisionneur à très haute énergie ne sont encore qu'à leurs débuts. Ces projets sont néanmoins d'une telle envergure qu'ils doivent être pensés dès leur départ comme des projets mondiaux.

Y aura-t-il bientôt des décisions prises ?

Compte tenu de la pandémie, il est difficile de discuter de ces projets dans une situation où tous les pays connaissent une crise qui menace la santé de millions de personnes et dont on ne connaît pas l'issue, ni l'impact sur nos sociétés. Dans ces circonstances exceptionnelles, la dernière réunion du Conseil du Cern s'est tenue en mars, pour la première fois par visioconférence, à un moment qui nécessite de mener des discussions plus approfondies. L'approbation de la stratégie, prévue pour être annoncée en mai 2020, a été donc repoussée. ■

Propos recueillis par Sylvain Guilbaud

▲ *Des travaux de maintenance et d'amélioration sont en cours au LHC, à l'arrêt depuis fin 2018 (ici, l'isolation électrique des diodes).*

MAXIMILIEN BRICE-JULIEN ORDAN/CERN

(*) **Le rayonnement synchrotron,** ou rayonnement de courbure, correspond à des ondes électromagnétiques émises par une particule chargée déviée par un champ magnétique (par exemple, lorsqu'elle tourne dans un collisionneur).

“ Avec le LHC à haute luminosité, nous traiterons 100 fois plus de données ”

4

Un chemin entre théorie et expérience

À quoi ressemble la physique des particules au-delà du modèle standard ? Les physiciens l'ignorent. Les théories qu'ils avaient imaginées, comme la supersymétrie, restent hypothétiques et la voie vers de nouvelles découvertes n'est pas toute tracée. Les approches théoriques doivent s'adapter à cette situation, en lien plus étroit avec les expériences.

Dans quelle direction chercher la nouvelle physique ? C'est la question qui se pose aujourd'hui aux physiciennes et physiciens des particules. Depuis plus de soixante ans, ils explorent le territoire du modèle standard, l'actuelle théorie de la physique des particules (lire p. 38). Ils ont déniché le quark top en 1995, le boson de Higgs en 2012, mesuré les interactions des forces fondamentales avec les particules. Bien sûr, les recoins continuent d'être fouillés, détaillés par des expériences de plus en plus précises. Mais les scientifiques savent reconnaître les limites de leur carte. La masse des neutrinos n'y apparaît pas, la matière noire (*) n'est pas indiquée, la valeur du champ de Higgs dans le vide pose problème (lire p. 40). Il doit donc y avoir quelque chose au-delà du modèle standard.

Dans cet exercice de navigation en haute mer, la théorie sert souvent de boussole. *« Cela a été le cas pour le boson de Higgs »*, rappelle Jon Butterworth, physicien à l'University College de Londres. La fameuse particule est une conséquence théorique du mécanisme de Brout-Englert-Higgs, lequel donne une masse aux bosons W et Z (qui véhiculent l'interaction faible) et, par extension, aux autres particules élémentaires. Le boson de Higgs a ensuite été trouvé expérimentalement dans la région du modèle standard indiquée, et les propriétés mesurées jusqu'à présent correspondent au portrait-robot qui avait été dressé au préalable. Toutefois, les théoriciennes et théoriciens ne s'étaient pas arrêtés là. En scrutant l'horizon, ils avaient esquissé le chemin vers de nouveaux continents potentiels.

Le plus célèbre d'entre eux est celui de la supersymétrie. Pour se le représenter, il faut comprendre que la notion de symétrie constitue un guide essentiel en physique. Un objet est symétrique si son apparence, ou ses propriétés, ne change pas lorsqu'on le transforme. Un carré ne change pas si on le tourne d'un angle de 90° ou de 180°. *« En théorie des champs, derrière toute symétrie se trouve une quantité physique conservée »*, explique Benjamin Fuks, théoricien au laboratoire de physique théorique et hautes énergies de Sorbonne Université. Par exemple, le fait que les lois de la physique sont les mêmes selon l'instant où on les teste – on parle alors de symétrie par translation dans le temps – se traduit par le fait que l'énergie est conservée !

(*) **La matière noire** serait présente en grande quantité dans l'Univers. Électriquement neutre, elle interagirait très peu avec la matière ordinaire, mais son influence gravitationnelle serait importante à l'échelle des galaxies et au-delà.

Contexte **Le modèle standard est la meilleure description actuelle de la physique de l'infiniment petit. Les physiciens savent qu'il est incomplet, mais peinent à trancher entre les multiples pistes théoriques nouvelles : les données expérimentales, qui permettent habituellement de valider une théorie, manquent. Comment avancer dans ce cadre nouveau ?**

Nouvelles particules

Cette correspondance, établie formellement par la mathématicienne allemande Emmy Noether en 1915, est très puissante. Si l'on observe que certaines quantités se conservent dans les expériences, alors la symétrie associée réduit le champ des possibles afin de trouver l'équation correspondante. Réciproquement, si la théorie présente des symétries, cela peut se traduire par des phénomènes observables. Dans le modèle standard, ce sont des symétries particulières, dites symétries de jauge, qui donnent ainsi naissance aux interactions

fondamentales dites « de jauge » (électromagnétisme, interactions forte et faible).

La supersymétrie consiste à ajouter une nouvelle symétrie reliant deux types de particules : les fermions, particules de matière (les électrons, les quarks, etc.), et les bosons, liés aux interactions de jauge (tels les gluons de l'interaction forte) ou au mécanisme de Higgs. *« Dans le modèle standard, ces deux types de particules possèdent des spins (*) différents : un spin entier pour les bosons, demi-entier pour les fermions »*, précise Benjamin Fuks. La supersymétrie suppose l'existence de nouvelles particules, partenaires des particules connues. Les bosons sont ainsi reliés à de nouvelles particules de spin demi-entier (le higgsino, les gluinos, etc.). Les fermions sont reliés à des « sfermions » de spin entier (le sélectron, les squarks, etc.).

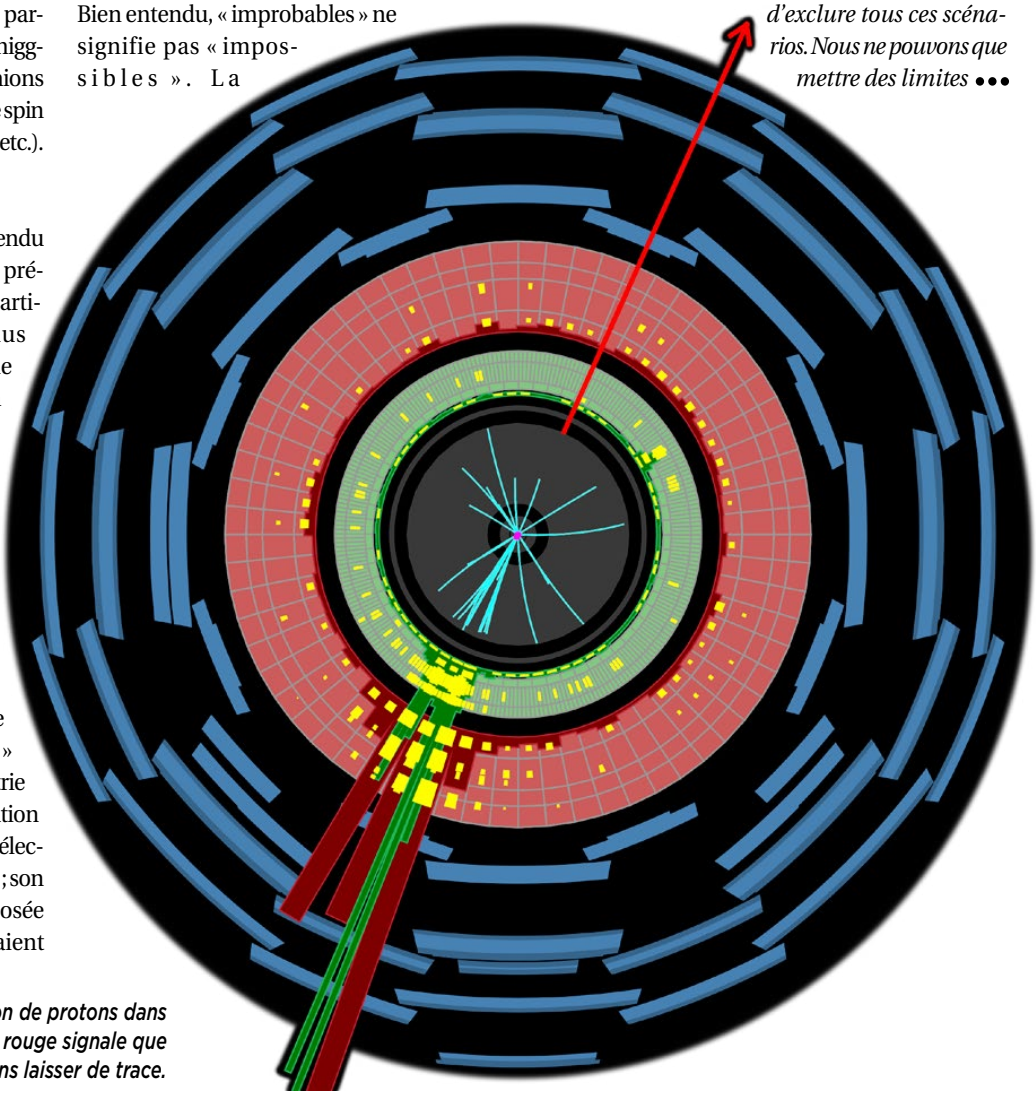
L'épreuve du LHC

Ce territoire, au moins aussi étendu que celui du modèle standard, présenterait bien des atouts. La particule supersymétrique la plus légère pourrait être stable (elle ne se désintégrerait pas en d'autres particules) et électriquement neutre : ce serait un candidat idéal pour incarner la matière noire dans l'Univers. Par ailleurs, l'influence des particules sur la valeur du champ de Higgs dans le vide serait compensée par l'influence de leurs partenaires, ce qui réglerait ce qu'on appelle le « problème de hiérarchie » (lire p. 40). Enfin, la supersymétrie offre des perspectives d'unification des interactions faible, forte et électromagnétique à haute énergie ; son existence est également supposée par des théories qui intégreraient la gravitation, comme la théorie des cordes.

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) au Cern, navire amiral de la physique des particules, a été conçu afin d'explorer notamment des phénomènes à l'échelle de quelques téraélectronvolts d'énergie (TeV), là où le continent supersymétrique présente le plus d'attraits. *« Cependant, nous n'avons pas trouvé l'île au trésor jusqu'à présent »*, confie Jon Butterworth, qui participe à l'expérience Atlas au LHC. *« En particulier, des scénarios où les squarks auraient une masse autour du TeV sont à présent hautement improbables, voire exclus »*, confirme Benjamin Fuks.

Bien entendu, « improbables » ne signifie pas « impossibles ». La supersymétrie n'est pas une théorie monolithique, il s'agit plutôt d'un cadre à l'intérieur duquel une multitude de possibilités existent. Rien que dans le modèle supersymétrique « minimal » – lequel part des particules connues du modèle standard, qu'il « supersymétrise » en rajoutant des partenaires –, il existe 105 paramètres libres (les masses des nouvelles particules, par exemple) qui peuvent être changés pour donner des scénarios différents ! Il est aussi possible de supposer l'existence de nouvelles particules avant de supersymétriser l'ensemble : les modèles sont alors dits « non minimaux ». *« D'un point de vue expérimental, il est impossible d'exclure tous ces scénarios. Nous ne pouvons que mettre des limites* •••

(*) **Le spin,** en physique quantique, est une grandeur qui caractérise les particules, comme leur charge électrique, à ceci près qu'elle n'a pas d'équivalent classique.



▸ *Résultat d'une collision de protons dans l'expérience Atlas. La flèche rouge signale que de l'énergie s'est échappée sans laisser de trace.*

CERN

••• *sur les masses et les couplages des particules hypothétiques »*, souligne Marie-Hélène Genest, physicienne au laboratoire de physique subatomique et cosmologie de l'université Grenoble-Alpes et membre de l'expérience Atlas au LHC.

La supersymétrie n'est donc peut-être pas une sirène imaginaire. Mais sa popularité a décru : d'autres paysages théoriques sont proposés à haute énergie, derrière l'horizon du modèle standard. Des dimensions supplémentaires de l'espace pourraient exister, mais seraient repliées à l'échelle microscopique. On observerait alors que chaque particule vient avec une infinité de copies de plus en plus massives, liées aux dimensions supplémentaires et baptisées excitations de Kaluza-Klein. Ou encore, selon une autre théorie, il existerait de nouveaux fermions, plus massifs que ceux qu'on connaît, qui pourraient se lier pour former notamment le boson de Higgs. Ils sont la base des « modèles composites ». Ce ne sont que quelques-unes des multiples pistes évoquées. Vers où faut-il alors mettre le cap ?

Modèles « simplifiés »

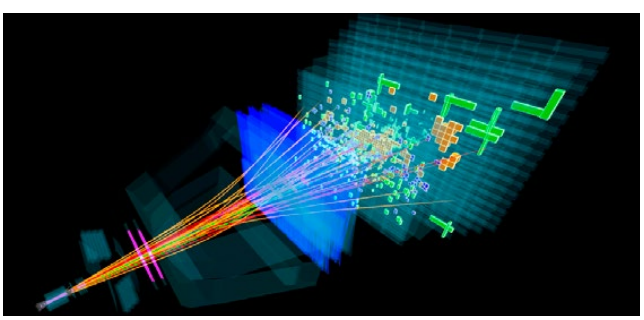
L'approche en vogue consiste à se détacher le plus possible de ces grandes théories et à se concentrer sur les signatures expérimentales observables dans les détecteurs. Théoriciens et expérimentateurs sont sur un même bateau, mais les premiers ne sont pas les capitaines visionnaires guidant les simples exécutants que seraient les seconds. *« Ma carrière ne consiste pas à optimiser la détection d'une signature particulière à une théorie, à ne rien trouver, puis à passer à une autre signature particulière, et ainsi de suite,* s'exclame Jon Butterworth. *Nous l'avons fait pour le boson de Higgs car ne pas le trouver aurait eu un impact retentissant. Aujourd'hui, exclure un scénario d'un modèle supersymétrique n'a rien d'exceptionnel. »*

105

PARAMÈTRES LIBRES peuvent être modifiés, dans le modèle supersymétrique minimal, pour donner des scénarios différents.

« Cette diversification des recherches s'est faite en collaboration avec les théoriciens, et non pas malgré eux », souligne Marie-Hélène Genest. Les scientifiques se concentrent donc sur les signatures expérimentales observables, indépendamment des théories générales et au-delà du modèle standard qui les prédirait. Au LHC, des protons collisionnent à haute énergie et produisent une myriade de particules. Un exemple de signature recherchée consiste en des jets (*) de hadrons et en de l'énergie manquante – c'est-à-dire quelque chose qui n'a pas été enregistré mais qui a dû nécessairement traverser le détecteur, sans quoi le

DES SIGNAUX QUI SORTENT DE LA NORMALE



▲ *Un événement détecté par l'expérience LHCb au Cern, spécialisée dans l'étude des quarks lourds.*

Aucune particule au-delà du modèle standard n'a encore été découverte au LHC, mais certaines mesures de l'expérience LHCb donnent des résultats inattendus. LHCb s'intéresse à certains processus de désintégration rares dans le modèle standard, en particulier ceux qui mettent en jeu les quarks b (bottom). Par exemple, un quark b peut se transformer en quark s (*strange* ou étrange), alors qu'une paire muon-antimuon est également émise. Ce processus s'explique dans le modèle standard mais il peut servir de sonde pour découvrir une nouvelle physique. En effet, si des particules inconnues existent à plus haute énergie, elles peuvent influencer indirectement les caractéristiques de cette désintégration, c'est-à-dire sans se manifester dans les détecteurs. Comme ce processus est rare, les déviations se remarquent plus facilement dans les analyses. En comparant les caractéristiques prévues théoriquement par le modèle standard avec les mesures expérimentales, les physiciens ont justement remarqué de telles anomalies : l'analyse de données du LHCb a permis d'en confirmer l'observation dans la répartition angulaire des trajectoires des particules issues de la transformation du quark b en quark s (1). D'autres anomalies se sont manifestées dans la fréquence d'observation de mécanismes similaires. Considérés de manière isolée, ces écarts aux prédictions ne sont pas très importants. Cependant, pris dans leur ensemble, ils forment un ensemble d'indices convergents. Nombre de modèles théoriques ont été mis au point afin d'imaginer une nouvelle physique qui expliquerait ces anomalies, dont l'existence d'une nouvelle particule appelée leptoquark. Cependant, ces anomalies pourraient très bien être dues aux incertitudes sur les caractéristiques prévues par le modèle standard, car les calculs théoriques de ces processus mettant en jeu l'interaction forte sont très complexes. Elles pourraient aussi n'être que des fluctuations statistiques, qui disparaîtraient à mesure de l'accumulation des données par LHCb et par l'expérience Belle II, en cours de démarrage au Japon.

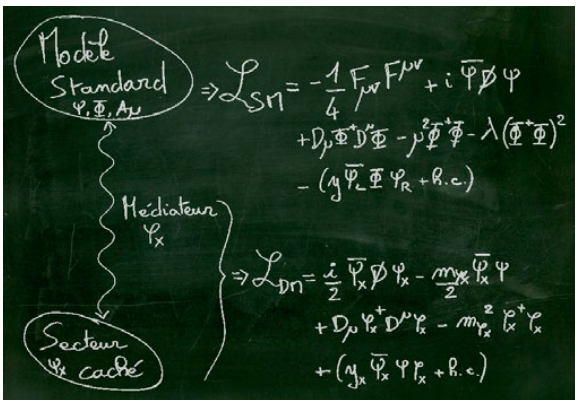
S. G.

(1) Collaboration LHCb, arXiv:2003.04831v1, 2020.

LHCB EXPERIMENT, LHCB COLLABORATION

compte n'y serait pas entre l'énergie des protons de départ et l'énergie des produits de la collision (l'énergie se conservant toujours). Cette énergie manquante pourrait être une particule de matière noire, d'où l'intérêt de chercher cette signature. Mais pour caractériser précisément ce qu'il faut chercher, un modèle théorique reste nécessaire. Les théoriciens élaborent donc des modèles « simplifiés ». *« On part du modèle standard, que l'on modifie légèrement en rajoutant deux particules hypothétiques, par exemple. Ce modèle ne contient donc que quelques paramètres libres,* décrit Benjamin Fuks. *On développe l'équation théorique, qui contient juste ce qu'il faut pour produire la signature ciblée de façon significative. »* Cette équation est ensuite entrée dans des codes numériques afin de simuler ses conséquences.

Les expérimentateurs conçoivent également leurs propres codes, qui simulent leurs gigantesques détecteurs, afin de voir ce qu'ils devraient trouver. Puis ils font les expériences, analysent les données (un travail qui concerne essentiellement les expérimentateurs car il faut comprendre le détail du fonctionnement des instruments). Ils en déduisent des limites sur les paramètres libres du modèle simplifié. *« Les théoriciens interprètent également ces résultats : telles valeurs des paramètres sont exclues, qu'est-ce que cela signifie ? Quels scénarios restent possibles ? »* poursuit Benjamin Fuks. Il y a ainsi une boucle de collaboration.



▲ *Dans cet exemple théorique, le modèle standard est complété par un secteur « caché » contenant une particule de matière noire.*

Scénarios en suspens

Les théories générales à haute énergie ne sont pas pour autant perdues de vue. Un modèle simplifié est une approximation dans un domaine limité à basse énergie. On peut décomposer une théorie en plusieurs modèles simplifiés. Réciproquement, un modèle simplifié peut être rattaché à différentes théories. Ainsi, l'exemple de la signature d'énergie manquante peut être interprété dans le cadre de la supersymétrie comme résultant d'une désintégration de squarks (particules supersymétriques) en quarks du modèle standard, accompagnés de particules supersymétriques de matière noire. Cette même signature peut également être interprétée dans le cadre des modèles à dimensions supplémentaires : la collision des protons donnerait lieu à une excitation de Kaluza-Klein des quarks et la matière noire correspondrait à une excitation du photon.

Les théoriciennes et théoriciens doivent ensuite prendre en compte toutes les contraintes provenant des résultats expérimentaux et vérifier qu'elles sont cohérentes avec les prédictions d'un scénario d'une théorie donnée. *« Cependant, exclure quoi que ce soit est difficile car il suffit de déplacer, dans la théorie, les nouveaux phénomènes à une énergie plus élevée, inatteignable au LHC, ou de rendre leur interaction avec les particules du modèle standard trop faible, donc les signatures trop rares au LHC, pour que le scénario reste possible malgré l'absence de preuve expérimentale »*, prévient Benjamin Fuks.

À défaut d'avoir découvert un nouveau continent, les scientifiques scrutent l'horizon afin de ne pas rater de signatures de nouvelle physique qui pourraient se produire dans les accélérateurs. Une piste viendra-t-elle d'un signal expérimental anormal (lire l'encadré) ou d'une percée théorique ? Personne ne peut le dire encore. La navigation dans les zones inconnues de la physique des particules est une aventure de longue haleine. ■

Sylvain Guilbaud

(*) **Un jet** est une gerbe de particules émises dans un cône très étroit, suite à une collision entre protons au LHC, par exemple. Ces particules sont des hadrons, c'est-à-dire constituées de quarks et de gluons.

Pour en savoir plus

La Recherche a publié

■ V. Glavieux, « Des expériences ébranlent la supersymétrie », *Les Dossiers de La Recherche* n° 4, juin-juillet 2013, p. 34.

■ V. Glavieux, « Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens », *La Recherche* n° 471, janvier 2013, p. 40.

■ D. Delbecq, « La particule X qui a fait courir les physiciens », *La Recherche* n° 519, janvier 2017, p. 45.

■ S. Guilbaud, « L'antimatière, jumelle de la matière… ou presque », *La Recherche* n° 522, avril 2017, p. 368.

■ S. Guilbaud, « Avec le problème de la matière noire, l'astronomie vit une crise », *La Recherche* n° 540, octobre 2018, p. 38.

À lire

■ Jon Butterworth, *Atom Land,* Quanto, 2019.

■ Sean Carrol, *Higgs, le boson manquant,* Belin, 2013.

■ Sabine Hossenfelder, *Lost in Maths. Comment la beauté égare la physique,* Les Belles Lettres, 2019.

Sur le Web

■ **home.cern/science/accelerators/accelerator-complex/panoramas**
Visite virtuelle du complexe des accélérateurs du Cern.

■ **symmetrymagazine.org**
Articles de vulgarisation des laboratoires Fermilab et Slac.

■ **lhcb.web.cern.ch/lhcb**
Le site de la collaboration LHCb.

■ **cms.cern** et **atlas.cern**
Pour tout savoir sur les expériences Atlas et CMS du LHC.

■ **fcc-cdr.web.cern.ch/webkit**
Un aperçu du projet de futur grand accélérateur de particules FCC envisagé en Europe.

■ **cerncourier.com**
Revue accessible en ligne rendant compte de l'actualité de la physique des hautes énergies.

SYLVAIN GUILBAUD

▲ *Le parc de Chiribiquete, en Amazonie colombienne, est parsemé de hauts plateaux de grès émergeant de la forêt, dont certains sont pourvus de peintures pariétales.*

Archéologie

Le patrimoine archéologique de l'Amazonie en péril

Stéphen Rostain, CNRS

L'Amazonie a connu un glorieux passé avant l'arrivée des Européens. Voilà 10 000 ans que les Amérindiens interagissent avec intelligence avec ce « continent » vert. Aujourd'hui, les traces archéologiques, botaniques, pédologiques et écologiques de ces interactions – terres noires, tertres, sites de peintures rupestres… – sont gravement menacées.

L'Amazonie brûle. Pourtant, la foudre n'y est pour rien, pas plus que la culture sur brûlis traditionnellement pratiquée dans la région. Ces feux ont une origine criminelle : ils ont été commandités par des cols blancs désireux de faire fructifier une sylve considérée comme improductive, et avides de récupérer des terres pour l'industrie agroalimentaire. La déforestation est clairement une affaire de gros bonnets, en particulier au Brésil, où 2 % des propriétaires terriens se partagent 50 % de l'espace rural.

On pointe du doigt ce pays car il abrite près de 60 % de l'Amazonie. C'est aussi là-bas que les dégâts sont les plus visibles : 2 254 km² de forêt y sont partis en fumée en juillet 2019, soit 278 % de plus que l'année précédente au cours du même mois. Si les causes de la déforestation en Amazonie varient avec le temps, l'élevage tient en ce moment le haut du pavé, suivi de loin par l'agriculture intensive (1). Ce sont bien les vaches et le soja qui allument en premier lieu les mortelles flambées.

Point de rupture

Certains appellent encore au calme en arguant que les feux sont inhérents à la forêt et que l'affolement n'est pas de mise. Ils se focalisent sur le doigt dénonciateur au lieu de regarder la catastrophe en cours. Fatale erreur, car on ne connaît pas le point de rupture de la sylve pluviale qui, tôt ou tard, sera incapable de retrouver son rôle crucial dans l'équilibre climatique global. Un jour viendra où nos larmes ne suffiront plus à éteindre les feux et à évacuer notre chagrin. L'Amazonie rêvée de Stefan Zweig, *« une nature libre et inépuisable »*, est une légende. C'est en réalité une vieille dame éreintée que l'on fait mourir à petit feu. Il faut bien prendre la mesure de la perte réelle pour l'humanité que représente cette crémation incontrôlée. •••

Contexte **Les incendies qui ont touché l'Amazonie à l'été 2019 ont ému le monde entier et ravivé l'idée d'une « forêt vierge », « poumon vert » de la planète, dont il faut préserver la « pureté ». Mais tout cela n'est qu'un mythe, comme le montrent les découvertes scientifiques de ces dernières décennies.**

STEPHEN ROSTAIN - DR

ARCHÉOLOGUE
Stéphen Rostain est spécialiste de l'Amazonie, où il a dirigé plusieurs programmes d'archéologie et d'écologie historique, notamment en Guyane et en Équateur.

••• L'Amazonie est peut-être le dernier lieu du globe à entretenir si farouchement nos fantasmes. Beaucoup croient encore en des eldorados perdus – certains n'hésitant pas à dépouiller de naïfs financeurs pour retrouver de chimériques Païtiti (*) –, en des sociétés matriarcales de femmes-guerrières amazones aux mœurs dévoyées, en des tribus isolées de féroces cannibales et autres fariboles qui remontent aux premières heures de l'arrivée des Européens dans le « Nouveau Monde ». Ultime refuge de nos légendes centenaires, l'Amazonie demeure dans l'imaginaire collectif un si puissant foyer de nature foisonnante, antinomique de ce qui est vu comme culturel par nos sociétés, qu'il est difficile à nombre d'entre nous d'admettre qu'on peut y trouver autre chose que de la barbarie. Pas étonnant que les récentes avancées scientifiques aient souvent du mal à convaincre. L'idée d'une forêt amplement anthropisée ne

Le mariage de l'histoire et de l'écologie a permis de porter un regard neuf sur ce monde

s'impose pas facilement. Des sceptiques refusent toujours la possibilité de sociétés complexes florissantes en Amazonie. Des esprits étroits croient encore que les champs surélevés précolombiens de Guyane ne peuvent pas être l'œuvre d'Amérindiens mais forcément de bagnards, etc.

Et pourtant, les preuves archéologiques, botaniques, pédologiques, écologiques et autres sont là et indéniables. C'est l'association des spécialités scientifiques par le biais d'une interdisciplinarité intime qui a permis ces révélations, notamment grâce à une approche en

écologie historique (2). Plus qu'un simple outil théorique ou un paradigme méthodologique, l'écologie historique est une manière de comprendre l'évolution de l'environnement sur le temps long et d'évaluer les variations plus ou moins prononcées de l'influence humaine qu'il a subie. Connaître l'importance de ces actions est particulièrement crucial à l'heure où les sociétés humaines sont devenues la principale force motrice du changement environnemental global – période pour laquelle a spécialement été créé le terme « Anthropocène » –, pour rendre compte de la dimension géologique de l'emprise humaine. En effet, en ces temps de perturbations climatiques globales marquées, les habitants et leur environnement doivent être abordés du point de vue de leur dynamique mutuelle, en appréciant les épisodes historiques, les pratiques culturelles et les stratégies de subsistance.

En Amazonie, cette approche a permis de sortir de l'étouffante vision réductrice du déterminisme environnemental. C'est bien le mariage de l'histoire et de l'écologie, au sens large, qui a permis de porter un nouveau regard sur ce monde sylvicole. Depuis une trentaine d'années, depuis que cette orientation s'est généralisée parmi les chercheurs, la forêt de la région n'est plus vue comme une nature vierge indomptable, mais bien comme résultant partiellement d'activités, voire de gestions humaines (3). Si certains estiment que les arbres constituent des artefacts vivants, d'autres vont encore plus loin en considérant que les plantes sont des êtres de compagnie pour les Amérindiens (4). On n'hésite pas à avancer communément l'expression de « paysage domestiqué », car la grande variété des processus socioculturels et historiques qui ont participé à façonner l'Amazonie durant l'Holocène (*) autorise à ranger cette immense aire parmi les grands biomes anthropiques mondiaux.

Depuis que les scientifiques ont appris à regarder et à interpréter objectivement les données, la richesse tropicale a été révélée. L'impact de l'humain sur ce milieu est indéniable, tandis que son intensité et sa pérennité ne cessent de surprendre. L'écologie historique en Amazonie s'inscrit donc au cœur du débat en cours sur le degré auquel les occupants précolombiens ont transformé les écosystèmes tropicaux. Et les dernières années ont apporté de solides éléments de réponse.

La nature n'est pas la seule à avoir créé le paysage, car les humains ont encouragé la biodiversité et la forme aujourd'hui observable du décor sylvicole. Les Amérindiens ont favorisé de manière consciente des associations d'espèces et en ont restreint d'autres, et ils ont sélectionné et planté dans la forêt pour constituer un environnement utile. Par exemple, l'anthropologue Darrell Posey a noté que les alentours d'un grand village kayapó du Brésil étaient profondément anthropisés. Le long des trois premiers kilomètres de chemin, il a répertorié 185 arbres plantés de 15 espèces différentes, près de 1 500 plantes médicinales et 5 500 plantes comestibles (5). Les Amérindiens ensemencent la forêt. Leurs enfants aussi, si bien qu'on peut les considérer parmi les principaux mammifères disséminateurs : lorsqu'ils

(*) **Païtiti** est une légendaire cité inca qui serait située sur le versant oriental des Andes, au Pérou ou en Bolivie, dans la forêt amazonienne. Elle aurait servi de refuge aux derniers Incas de la dynastie et aux trésors qu'ils auraient cachés des conquistadors.

(*) **L'Holocène** est le nom de l'époque géologique s'étendant sur les 10 000 dernières années.

(*) **Les terres noires** sont un type de sol sombre d'origine humaine et d'une fertilité exceptionnelle due à des concentrations particulièrement élevées en charbon de bois, en matière organique et en nutriments.

D_MAP - FABIEN LEHALLE

▲ *Les Amazoniennes ont une connaissance approfondie du monde végétal. Ici, une cultivatrice waorani du parc Yasuni, en Équateur.*

mangent très fréquemment des fruits, leur sucrerie tropicale naturelle, ils participent en effet à répandre ces plantes en rejetant un peu partout les noyaux. En plus de dix mille ans de présence, de circulation et d'habitation, les premiers habitants d'Amazonie ont ainsi contribué à façonner la plus grande forêt tropicale du monde.

Un territoire remodelé

Les sols ont également été modifiés, jusqu'à parfois devenir des terres noires (*). Ces aires, notamment présentes le long de l'Amazone et des grandes rivières, résultent bien sûr de phénomènes biochimiques naturels, mais ceux-ci sont induits à l'origine par les activités humaines et probablement favorisés volontairement pour créer des sols fertiles. De même, d'innombrables terrassements ont fondamentalement affecté le modelé même des espaces. Les populations précolombiennes ont changé la morphologie de la région. L'Amérindien a creusé, retourné, transporté, surélevé et rassemblé des milliers de mètres cubes de terre, remaniant plus ou moins radicalement le modelé de son territoire. Ces ouvrages en terre ont laissé un paysage très modifié par des monticules monumentaux, des plates-formes d'habitation, des villages entourés de systèmes de fossés, tous associés à des routes surélevées, des systèmes de canaux, des fosses, des réservoirs et des digues. Rajoutons à cela d'immenses espaces agricoles de champs surélevés de toutes les formes, tailles et distributions. Ces sites imposants sont situés sur le piémont oriental des Andes, à l'embouchure du grand fleuve, de l'Amazonie centrale aux Llanos de Mojos en Bolivie, du Haut-Xingu à la côte des Guyanes. Certains suggèrent même qu'ils représenteraient l'émergence de sociétés pré-urbaines.

L'un des exemples les plus marquants est sans nul doute la vallée de l'Upano, en Équateur. Il y a environ 2 500 ans, les habitants ont commencé à y construire un peu partout des complexes de monticules quadrangulaires. Ces tertres mesurent 3 à 20 m de largeur et 10 à 100 m de longueur au sommet, la hauteur variant entre 2 et 8 m. Au cours des années, ils ont investi les terrasses bordant le fleuve sur une distance de près de 50 km et une largeur moyenne de 10 km. D'innombrables tertres ont été élevés, des reliefs naturels arasés ou aplanis et des places basses nivelées, tandis que de larges chemins creusés connectaient les différents sites. Ces derniers prouvent d'ailleurs la contemporanéité des occupations. Car les monticules ne sont pas disposés selon un modèle naturaliste, mais délimitent un espace ouvert. Un complexe se compose habituellement de quatre ou six monticules autour d'une place centrale, avec parfois un monticule au milieu. La délimitation d'une place carrée ou rectangulaire, basse et plate, •••

2 254

KILOMÈTRES CARRÉS de forêt amazonienne brésilienne sont partis en fumée durant le seul mois de juillet 2019.

▲ *Grâce à la photographie et à la télédétection par laser aéroporté, plusieurs complexes de tertres artificiels de terre, datés d'il y a plus de 2 000 ans, ont été mis au jour dans la vallée de l'Upano, en Équateur.*

STEPHEN ROSTAIN - H. PRÜMERS - STEPHEN ROSTAIN

••• est à la base de la configuration spatiale de la vallée de l'Upano. Elle est fermée sur quatre côtés par des monticules, des pentes modifiées, des berges ou des sentiers creusés. Des variations peuvent se produire, mais le schéma de base est toujours le même. Si la distribution n'est pas toujours parfaitement géométrique, le modèle reste respecté. Il y a souvent de petits sentiers creusés pour relier le complexe à un cours d'eau adjacent ou à un étang.

Des prises de vues récentes au Lidar (*) ont révélé l'ampleur insoupçonnée des terrassements précolombiens, en dévoilant la morphologie exacte du modelé de terrain jusqu'alors camouflé sous le couvert forestier. Là où l'on avait répertorié quelques centaines de monticules par des reconnaissances terrestres, ce sont en vérité des milliers de structures qui ont été mises au jour. En fin de compte, toute la moyenne vallée a été sculptée pour offrir un paysage fortement anthropisé.

On s'interroge encore pour savoir si cette multitude de sites architecturaux correspond à un pouvoir central contrôlant un vaste territoire ou à plusieurs chefs locaux implantés dans des palais perchés sur les tertres. Ce dernier cas de figure pourrait évoquer les petites royautés

▲ *Les savanes inondables du littoral de la Guyane française sont parsemées de champs surélevés d'origine précolombienne.*

natchez (*) ou powhatans (*) des États-Unis. Reconnaître une telle « monarchie primitive » permettrait d'expliquer l'émergence des sociétés dites complexes dans les basses terres sud-américaines.

Les recherches archéologiques des dernières décennies et l'application de nouvelles technologies, comme la documentation Lidar, ont révolutionné notre capacité à comprendre l'étendue et la complexité des sociétés amazoniennes. Aujourd'hui, les archéologues sont en train de mettre en évidence ces systèmes de gestion des paysages précoloniaux, de repenser la nature des sociétés pré-industrielles, d'identifier les modèles de concentration spatiale et d'urbanisation et de réévaluer leur impact sur la dynamique sociale, les aspects sociopolitiques et la résistance des sociétés.

L'héritage des habitants originels d'Amazonie est peu à peu dévoilé, à la grande stupeur de nombreux observateurs. De timides reconnaissances commencent à voir le jour. Et il était temps, car les risques de vandalisme s'intensifient. L'exemple le plus représentatif est certainement celui de Chiribiquete, au centre de l'Amazonie colombienne (6). Cet ensemble de sites de peintures rupestres a survécu à plus de 10 000 ans d'intempéries, à la destruction presque complète du monde amérindien par la conquête européenne, à des années d'occupation par les narcotrafiquants et par la guérilla des Forces armées révolutionnaires de Colombie. Aujourd'hui, il semble menacé par les incendies, l'expansion de l'exploitation pétrolière et le front de colonisation occidental.

(*) **Le Lidar** est une méthode de télédétection par laser aéroporté.

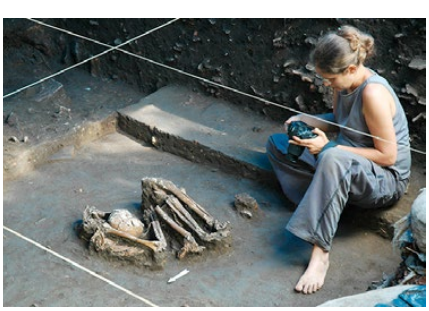
(*) **Les Natchez** sont un peuple amérindien ayant vécu dans le Mississippi, qui fut vaincu et dispersé vers 1730, après plusieurs guerres contre les Français.

(*) **Les Powhatans** sont une confédération de tribus amérindiennes d'Amérique du Nord ayant vécu en Virginie. À la suite de deux guerres avec les Anglais, la confédération fut dispersée en 1646.

Site classé à l'Unesco

Le lieu même n'est pas banal, puisqu'il s'agit d'un ensemble de plateaux couvrant plus de 6,7 millions d'hectares, presque la superficie de l'Irlande. On y trouve de spectaculaires formations qui surgissent de la forêt comme des géants torturés de pierre, pour culminer

ARCHÉOLOGUES AU FÉMININ



▲ *Anne Rapp Py-Daniel, spécialiste de l'archéologie funéraire amazonienne, sur le site de Hatahara, près de Manaus.*

L'archéologie est en général dominée par les hommes. Il existe pourtant une clairière où les femmes sont plus nombreuses que les hommes dans cette discipline. En Amazonie brésilienne, elles sont ainsi presque le double, et cette tendance a commencé quasiment au début de l'archéologie dans le pays, il n'y a pas loin d'un siècle. Si les pionnières de la seconde moitié du XX^e siècle sont nord-américaines – Helen C. Palmatary, Betty J. Meggers et Anna C. Roosevelt – leurs héritières sont en grande majorité brésiliennes. Elles investissent tous les champs de la recherche, de l'étude de la poterie à la technologie lithique, de l'iconographie céramique à l'art rupestre, de la faune consommée aux plantes cultivées, de l'espace domestique au traitement des défunts, des sols de terre noire à l'anthropisation du paysage, de la patrimonialisation à la sensibilisation des populations locales. S. R.

À lire : Stéphen Rostain, *Amazonie, l'archéologie au féminin,* Belin, à paraître le 26 août, 336 p., 24 €.

STEPHEN ROSTAIN - E. NEVES

à quelque 1 000 m d'altitude. Ce sont des *tepuyes,* identiques à ceux du Venezuela, rendus célèbres par *Le Monde perdu,* le roman de Sir Arthur Conan Doyle. L'ensemble du parc national de Chiribiquete a été classé au patrimoine mondial de l'Unesco en 2018. L'événement est loin d'être anodin, car c'est la première fois qu'un site archéologique précolombien d'Amazonie reçoit cet honneur.

Cette reconnaissance est aussi largement méritée, car les découvertes qui ont été faites sur place ont été sensationnelles. Des dizaines d'abris-sous-roche de Chiribiquete, comme ceux des *tepuyes* de La Lindosa à une centaine de kilomètres au nord, ont été peints de motifs sur de grandes superficies. Si les plus anciens dessins remontent probablement à la fin du Pléistocène (2,58 millions d'années à 11 700 ans avant le présent), il semble que l'habitude se soit poursuivie jusqu'à nos jours, puisque des tribus isolées sont supposées continuer à y peindre. Ce sont des ribambelles d'animaux, d'humains, de non-humains, d'esprits et de végétaux qui se superposent dans ce grand livre illustré lithique. Ces pictogrammes sont souvent organisés en scènes, témoignages probables de récits mythologiques. Certains d'entre eux correspondent d'ailleurs assez bien à des mythes d'origine encore vivaces dans les communautés amérindiennes de la région. Cet art pariétal est donc un précieux legs de la pensée intime des peuples millénaires de la forêt.

▲ *À une centaine de kilomètres de Chiribiquete, en Colombie, les parois des* tepuyes *de La Lindosa sont elles aussi couvertes de pictogrammes dont l'origine remonte à des millénaires.*

Un futur hypothéqué

Le renouveau de l'archéologie amazonienne dans ces dernières décennies a effacé l'image réductrice d'un peuplement archaïque et barbare, colportée par des esprits conservateurs, pour mettre en exergue une histoire complexe de sociétés parfaitement adaptées à la sylve et extrêmement dynamiques. La prééminence technologique et culturelle des foyers d'innovation traditionnellement acceptés – les Andes et la Mésoamérique – a été mise à mal. Loin d'être un espace de débilitation culturelle et une simple débitrice, l'Amazonie fut également le berceau d'inventions essentielles. On y trouve ainsi la première céramique des Amériques ou les preuves de la domestication d'au moins 86 plantes. Par exemple, le cacao y est consommé 1 500 ans avant le Guatemala.

Les habitants de la forêt ont développé des stratégies d'acquisition originales, tout en mettant au point des systèmes techniques primordiaux, apparaissant comme des précurseurs par rapport à d'autres régions biogéographiques. Leur interaction avec l'environnement, et particulièrement leur gestion adaptée du milieu, suscite l'admiration. Peuples fondamentalement animistes, ils défendent l'idée d'une continuité entre la nature et la culture, entre tous les êtres vivants. Les non-humains sont ainsi considérés comme entretenant des relations similaires à celles qui existent entre les humains. Cette conception du monde a créé une harmonie où l'exploitation n'implique pas la destruction, mais bien au contraire la régénération.

Ce savoir et ce monde sont en danger. La tragédie d'une déforestation accélérée en cours en Amazonie, mise en avant à l'été 2019, est une nouvelle alerte. Ce n'est pas une bibliothèque végétale qui brûle, mais un patrimoine mondial de l'humanité qui part en fumée, et un avenir écologique et humanitaire qui se trouve compromis. Reviennent alors en mémoire les mots qu'écrivait Pierre de Ronsard à propos du meurtre de la forêt française : *« Écoute, bûcheron, arrête un peu le bras. »* ■

POUR EN SAVOIR PLUS

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

■ Stéphen Rostain, *Amazonie. Un jardin sauvage ou une forêt domestiquée,* Actes Sud, 2016.

■ Charles C. Mann, *1491. Nouvelles révélations sur les Amériques avant Christophe Colomb,* Albin Michel, 2007.

(1) F. Seymour et N. L. Harris, *Science, 365,* 756, 2019.

(2) S. Rostain et G. de Saulieu (dir.), *Les Nouvelles de l'archéologie, 152,* 2018.

(3) G. Odonne *et al., Ecology, 100,* e02806, 2019.

(4) F. Carlos et E. G. Neves, *Antiquity, 92,* 1604, 2018.

(5) D. A. Posey, *Agroforestry Syst., 3,* 139, 1985.

(6) S. Rostain, *Pour la Science, 498,* 24, 2019.

STEPHEN ROSTAIN

Les rayons X percent les secrets des puces électroniques

Stéphanie Anceau, CEA

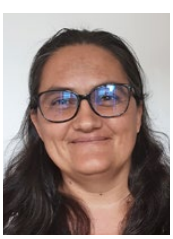
En exposant un circuit intégré à un faisceau de rayonnement X ultra-focalisé, des chercheurs grenoblois parviennent à en modifier un par un les transistors. La mise au point de ces outils à partir d'un procédé encore expérimental stimule la recherche de nouvelles protections contre ces attaques par reprogrammation des circuits.

La sécurité informatique repose sur l'art de protéger efficacement les secrets contre des attaques. Cela nécessite d'utiliser des algorithmes cryptographiques publics dont la sécurité a été évaluée par la communauté des experts. Ces algorithmes reposent sur des clés de chiffrement longues et difficiles à reconstruire. Mais il est également nécessaire d'éviter que les secrets puissent être révélés lors de fuites inopportunes. Ainsi, en 2013, une équipe israélienne a montré qu'en analysant les vibrations acoustiques émises par le processeur d'un ordinateur, il était possible de retrouver la clé de chiffrement utilisée, alors qu'il serait impossible de la déterminer en la calculant directement (1). Cette attaque entre dans la catégorie de ce que l'on nomme les « attaques par canaux auxiliaires ». On peut également mentionner les attaques fondées sur l'utilisation de sondes physiques, comme des lasers, des sondes ioniques ou électromagnétiques, qui visent à perturber ou récupérer les données qui peuvent fuir des circuits électroniques. Ces attaques sont le plus souvent invasives et le circuit est physiquement modifié. Au CEA, des équipes travaillent pour tester la résistance des composants à ce type d'actions, tandis que d'autres mettent au point de nouveaux moyens de s'en prémunir.

Parades physiques

Un circuit intégré est généralement composé de plusieurs millions de transistors permettant de réaliser différentes fonctions : mémoires volatiles (RAM) et non-volatiles (EEPROM-Flash), fonctions analogiques (horloges, pompes de charge, générateurs d'aléas, etc.) et fonctions numériques pour traiter l'information, la chiffrer et la déchiffrer. Le circuit peut, selon les cas, être utilisé dans une carte à puce, un téléphone portable, un ordinateur… De nouvelles attaques physiques sont régulièrement imaginées par des pirates afin de mettre à mal la sécurité et l'intégrité de ces circuits intégrés. Les résultats des analyses sécuritaires menées à travers le monde permettent aux développeurs de circuits intégrés de vérifier la sécurité des protections qu'ils ont mises en place dans leurs produits.

Depuis une vingtaine d'années, la modification des circuits intégrés s'effectue à l'aide d'une sonde ionique focalisée, appelée Focused Ion Beam (FIB). Cette machine de laboratoire, volumineuse (et coûteuse), se compose d'une colonne ionique et de plusieurs injecteurs de gaz qui permettent, selon les cas, de graver des zones du circuit intégré ou de déposer des matériaux sur sa face avant ou arrière. Avant de modifier le circuit, il faut d'abord



DR

PHYSICIENNE
Stéphanie Anceau est chercheuse au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Elle mène ses travaux à Grenoble.

Contexte

Pour voler les secrets d'un système informatique, un opérateur peut mener plusieurs types d'attaques, dont certaines reposent sur l'utilisation de sondes (laser, ioniques, électromagnétiques) qui visent à perturber ou à récupérer les données qui peuvent fuir des circuits électroniques.

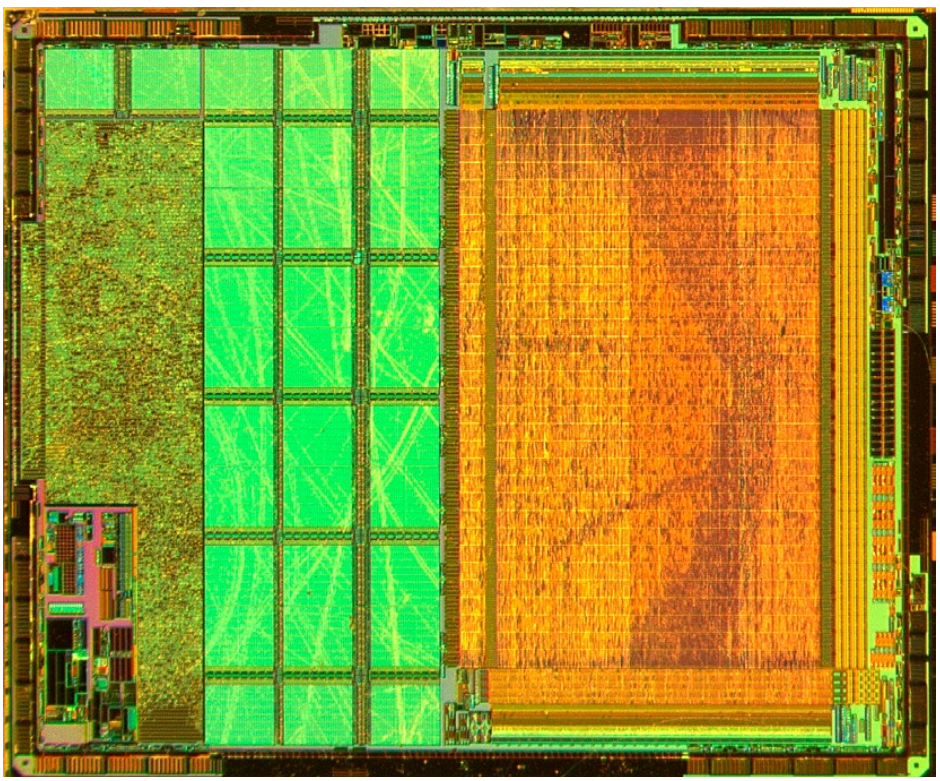
le préparer, par exemple en le retirant du boîtier dans lequel il est encapsulé, ou l'amincir. Puis, une fois placé dans le FIB, on peut commencer à le modifier, par exemple en coupant certaines de ses pistes métalliques qui interconnectent ses fonctions ou en créant de nouvelles connexions ou des pointes de mesures (par l'ajout local de fines couches de métal). Cette étape, appelée édition du circuit, permet ainsi de créer des déviations et d'ajouter des plots de contact pour poser, plus tard, des pointes de mesures destinées à récupérer ou perturber certains signaux à l'intérieur du circuit intégré.

Dans les circuits intégrés utilisés dans des applications de sécurité, ce travail est rendu très difficile par la présence de parades physiques : ces protections anti-intrusion sont par exemple des pistes métalliques entrelacées et mises en place pour empêcher un accès simple aux signaux internes. Pour contourner ces parades, il faut faire des détours de fils et percer entre ces détours pour retrouver le signal qui passe sous ces protections. Ces actions ne peuvent se faire qu'à l'aide de FIB de dernière génération, qui ne sont pas accessibles à tous.

Chercher les failles

Une fois ces modifications réalisées, il devient possible de lire certains signaux internes du circuit intégré. Dans ceux de dernière génération présentant un niveau de sécurité élevé, ces signaux peuvent être chiffrés. Les données lues vont permettre de reconstruire des informations secrètes grâce à une analyse cryptographique. Lorsque plusieurs signaux internes du même algorithme sont obtenus, il devient possible d'extraire des informations partielles, qui sont ensuite analysées par des méthodes de cryptanalyse (*). Comme pour les méthodes d'attaque par canaux auxiliaires habituelles, si l'on dispose de suffisamment d'informations, on parvient à récupérer des données secrètes contenues dans la puce, même si elles sont chiffrées avec des algorithmes réputés sûrs tels que l'AES (*) (2).

À la demande des concepteurs de circuits, nous réalisons régulièrement des attaques ciblées sur des composants sécurisés ; l'objectif est de vérifier l'absence de vulnérabilités. Si des failles sont détectées, le développeur peut alors les corriger et ainsi renforcer la sécurité de ces produits. Lors de ces évaluations de sécurité, outre le FIB, nous utilisons aussi des lasers pour conduire des attaques par injection de fautes. En effet, à l'aide d'un faisceau laser infrarouge focalisé, nous parvenons à modifier le comportement des transistors localisés dans la zone d'exposition, dont le diamètre est de quelques micromètres. Selon la technologie de fabrication du circuit intégré, cela peut tout de même représenter entre une centaine et un millier de transistors. À ce stade, il n'existe pas encore de lasers d'une résolution assez fine pour permettre de perturber les transistors individuellement et de maîtriser ainsi les modifications du circuit intégré.

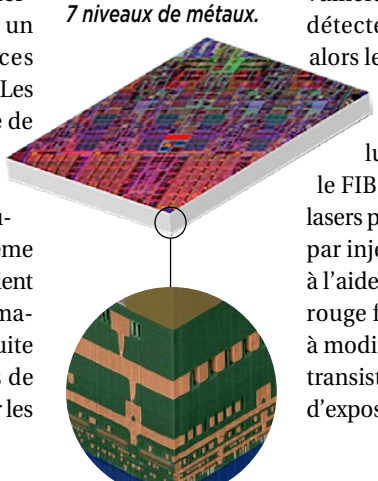


▲ *Vue au microscope d'un circuit intégré comprenant des millions de transistors. C'est ce type de circuit que l'on peut manipuler à l'aide de sondes ioniques, de lasers ou d'un rayonnement X focalisé.*

(*) La cryptanalyse regroupe les techniques d'attaque d'un système pour y récupérer des données secrètes.

(*) L'algorithme AES est le standard de chiffrement cryptographique à clé secrète adopté dans le monde depuis 2002.

▼ *Coupe d'un circuit intégré de carte à puce, avec les 7 niveaux de métaux.*



La résolution des lasers n'est pas assez fine pour perturber les transistors individuellement

Ce constat nous a conduits à explorer de nouvelles voies pour injecter ces fautes. L'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF), basée à Grenoble, dispose d'équipements exceptionnels qui permettent de focaliser des photons à des •••

CEA

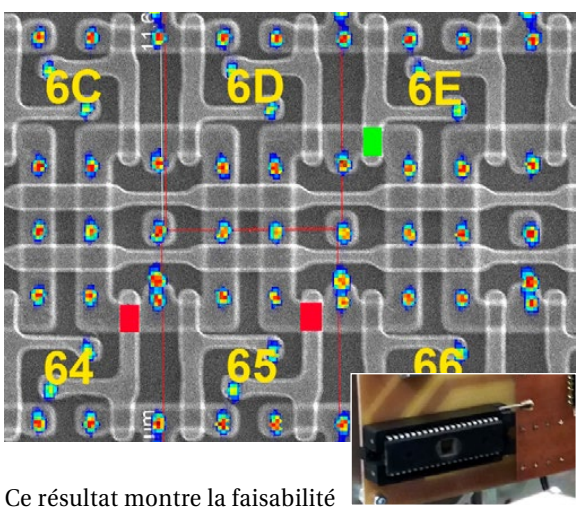
••• dimensions nanométriques. Ce synchrotron européen permet ainsi de créer des faisceaux de rayonnement X ultra-focalisés qui, comme les photons infrarouges, sont capables de perturber les circuits intégrés. L'impact de ces photons sur les circuits intégrés est connu depuis longtemps, puisqu'il a été mis en évidence dès les premiers vols spatiaux (3). Depuis, les circuits intégrés utilisés dans des systèmes électroniques destinés à être envoyés dans le cosmos sont systématiquement « durcis » afin de renforcer leur résistance à ces rayonnements ionisants ambiants qui pourraient par exemple effacer les cellules mémoires ou encore créer des défauts dans les couches isolantes des circuits intégrés.

Il devient possible d'introduire des fautes permanentes dans les algorithmes cryptographiques

Mais, bien que cet effet indésirable soit connu, il n'avait jusqu'alors jamais été utilisé pour perturber des circuits intégrés à dessein. En focalisant un tel faisceau de rayons X de 50 nanomètres (nm) de diamètre obtenu à l'ESRF, nous sommes parvenus à modifier le contenu d'une unique cellule mémoire (changer un 1 en 0, par exemple) sur des circuits gravés en technologie de fabrication 45 nm (4).

Cette nouvelle méthode présente plusieurs avantages : elle ne nécessite pas d'ouvrir le circuit, le faisceau X traversant le boîtier ; lorsqu'on chauffe le circuit à 150 °C, après l'avoir modifié, il revient à son état initial. Autrement dit, on peut collecter ou modifier une information secrète sans altérer le processeur ni modifier physiquement le composant. De plus, cette modification est réversible.

▲ *Le synchrotron ESRF, à Grenoble, produit des rayonnements X aptes à perturber des circuits intégrés.*



▲ *En irradiant une puce à l'aide de rayons X, on obtient par fluorescence l'emplacement des contacts des transistors (taches colorées). Les rayons X sont alors utilisés pour modifier l'état naturel de transistors individuels (rouge : 1 ; vert : 0 ; en jaune, l'adresse des cellules mémoires).*

Ce résultat montre la faisabilité d'un nouveau type d'attaques extrêmement ciblées sur les circuits intégrés. Être capable de perturber une cellule mémoire individuelle et un transistor unique signifie, en pratique, qu'il devient possible d'introduire des fautes permanentes dans les algorithmes cryptographiques implantés dans le circuit, de désactiver des mécanismes de sécurité, et même de reprogrammer le circuit.

Même si ce type d'attaque reste difficile à mettre en œuvre actuellement, il apparaît d'ores et déjà nécessaire d'en tenir compte pour les circuits utilisés dans les applications de très haute sécurité. Les techniques d'attaque laser, jugées irréalistes il y a 20 ans, sont désormais un standard dans les centres d'évaluation sécuritaire. Il est donc possible que ces nouvelles méthodes à rayonnement X très focalisé puissent, dans quelques années, faire partie du processus de certification sécuritaire. Cette perspective stimule nos travaux de recherche et ceux de nos collègues grenoblois rassemblés dans le Cybersecurity Institute de l'université Grenoble Alpes pour concevoir de nouvelles contre-mesures matérielles, directement intégrées aux circuits ou logicielles, telles que des algorithmes de vérification d'intégrité. ■

(1) D. Genkin *et al.*, *IACR ePrint, 2013/857,* 2013.

(2) S. P. Skorobogatov et R. J. Anderson, « Revised Papers from the 4th International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems-CHES 2002 », 2002.

(3) R. Micheloni *et al.*, *Inside NAND Flash Memories,* Springer, 2010.

(4) S. Anceau *et al.*, *in Cryptographic Hardware and Embedded Systems-CHES 2017,* Springer, p. 175, 2017.

ERSF - CESTI-CEA-LETI

La Recherche Complétez votre collection

LE MENSUEL
6,40€ le numéro

Année 2018
- **N°531 janvier 2018**
  Les 10 découvertes de l'année.
- **N°532 février 2018**
  La révolution microbiote.
- **N°533 mars 2018**
  Voir les trous noirs pour révéler une nouvelle histoire de l'univers.
- **N°534 avril 2018**
  La neuroscience des émotions.
- **N°535 mai 2018**
  Planète Mars, 50 ans d'exploration spatiale.
- **N°536 juin 2018**
  Comment l'homme va évoluer.
- **N°537-538 juillet-août 2018**
  Chaos et systèmes complexes.
- **N°539 septembre 2018**
  Pédagogie et neurosciences.
- **N°540 octobre 2018**
  Matière noire.
- **N°541 novembre 2018**
  Les maths du secret.
- **N°542 décembre 2018**
  Les nouvelles armes contre le cancer

Année 2019
- **N°543 janvier 2019**
  Les 10 découvertes de l'année.
- **N°544 février 2019**
  L'Entropie, comprendre une grande énigme scientifique.
- **N°545 mars 2019**
  Intelligence, comment la mesurer ?
- **N°546 avril 2019**
  La Voie lactée et ses galaxies cousines naines.
- **N°547 mai 2019**
  La 2e révolution quantique.
- **N°548 juin 2019**
  Génétique et épigénétique, l'influence de l'environnement.
- **N°549-550 juillet-août 2019**
  Le hasard et ses lois.
- **N°551 septembre 2019**
  Ondes gravitationnelles, la nouvelle astrophysique.
- **N°552 octobre 2019**
  Comprendre Alzheimer.
- **N°553 novembre 2019**
  Climat.

LES HORS-SÉRIE
6,90€ le numéro

Année 2018
SP25 : Le sommeil et le rêve, comment le cerveau se régénère

SP26: 100 jeux mathématiques et 25 énigmes policières

SP27 : 20 scientifiques répondent à 20 questions métaphysiques

SP28 : Vivre longtemps en bonne santé

Année 2019
SP29 : Ces molécules qui nous empoisonnent
SP30 : Le génie de l'animal : intelligence, empathie, habilité
SP31 : Les maths et le réel, comment décoder le monde ?

Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros**
18€ seulement
(hors frais de port)

Retrouvez l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.larecherche.fr

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à SOPHIA PUBLICATIONS - LA RECHERCHE
8 rue d'Aboukir - 75002 Paris - commandes@sophiapublications.fr - 01 70 98 19 24

VPC559

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Tél : @

Pour une meilleure gestion de votre commande, merci de nous indiquer votre email

☐ J'accepte de recevoir par mail, des offres des partenaires de La Recherche

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire	TOTAL
■ LA RECHERCHE		6,40 €	€
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE		6,90€	€
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros		18,00 €	€
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€** le numéro / + **0,50€** le numéro supplémentaire **6,85€** l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.			€ €
Total de ma commande (Frais de port inclus)			€

Je règle aujourd'hui par chèque à l'ordre de ***SOPHIA PUBLICATIONS***

Pour tout paiement par CB, rendez-vous sur le site www.larecherche.fr

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement

La société Sophia Publications située au 8 rue d'Aboukir, Paris 2e est responsable de traitement et collecte des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 6 ans à partir de votre dernier achat. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiapublications.fr en joignant ne copie de votre carte d'identité. La société Sophia Publications dispose d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 8 rue d'Aboukir, Paris 2e ou à l'adresse mail dpo@sophiapublications.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

Entretien avec **Marin Dacos**
CNRS

« Il faut mieux reconnaître les chercheurs pratiquant la science ouverte »

Rendre librement accessibles les résultats de la recherche, tel est l'objectif de la science ouverte. Promoteur et acteur de ce mouvement d'ampleur, Marin Dacos analyse comment les comportements changent dans la communauté scientifique afin de permettre ce bouleversement de l'accès à la connaissance.

La Recherche **Le dernier baromètre français de la science ouverte indique qu'en décembre 2019, 49 % des 155 000 publications scientifiques françaises (*) publiées en 2018 étaient disponibles en accès ouvert (1). Tous les champs disciplinaires sont-ils concernés ?**

Marin Dacos Oui, cela s'observe dans toutes les disciplines. Pour les mathématiques, qui sont en tête, le taux d'accès ouvert des publications de 2017 est passé de 62 % en 2018 à 73 % en 2019. En sciences sociales, il est passé de 30 % en 2018 (c'était le taux le plus bas) à 43 % en 2019. Cette augmentation généralisée est très encourageante, parce qu'il est important d'ouvrir les résultats de la recherche au public le plus large. Afin de renforcer le mouvement, le Plan national pour la science ouverte rend l'accès ouvert obligatoire pour les publications issues de travaux financés sur fonds publics dans le cadre d'appels à projets.

Y a-t-il un mode d'accès ouvert qui prédomine ?

Il y a deux façons d'être diffusé en accès ouvert. La première, ce sont les revues nativement en accès ouvert, sur le site Web de l'éditeur. Avec deux modalités de financement selon les revues : des frais de publication payés par l'auteur, ou un financement forfaitaire de l'éditeur par des acteurs publics. La seconde, ce sont des archives numériques ouvertes. Par exemple arXiv, créée en 1991 par et pour les physiciens ; ou HAL, l'archive nationale française, créée en 2001 par le CNRS. Dans ce cas, c'est l'auteur qui est acteur de l'ouverture, en choisissant de déposer (ou non) ses articles dans une telle archive. Il n'a rien à payer, le lecteur non plus, mais bien sûr le système a un coût. Le baromètre de la science ouverte indique que, sur l'ensemble des articles publiés en 2018, 12 % sont accessibles uniquement sur le site Web de l'éditeur, 16 % seulement sur une archive ouverte, et 21 % à la fois sur le site Web de l'éditeur et sur une archive ouverte.

Contexte **La mise en œuvre de la science ouverte s'appuie sur le développement de plateformes numériques. À l'échelle française, cette démarche est en particulier appuyée par le Plan national pour la science ouverte, lancé en juillet 2018. Au CNRS, l'objectif est de proposer 100 % des publications en libre accès fin 2020.**

(*) **Les publications scientifiques françaises** désignent les publications ayant au moins une affiliation française.

Laquelle de ces deux options le Plan national pour la science ouverte, qui a été mis en place en juillet 2018, privilégie-t-il ?

La loi pour une République numérique, votée en 2016, a donné le droit aux chercheurs dont les travaux sont financés pour moitié sur fonds publics de mettre gratuitement à disposition leur article, même s'ils avaient signé un contrat d'exclusivité avec l'éditeur. Il y a tout de même un délai à respecter – six mois pour les sciences exactes et la médecine, douze mois pour les sciences humaines et sociales. Les politiques publiques françaises d'avant 2018 ont très fortement privilégié les archives ouvertes. Ce n'est plus le cas avec le Plan national pour la science ouverte, car il faut tenir compte des usages de chaque discipline. Les mathématiciens passent par les archives ouvertes, et les biologistes par les revues en accès ouvert ? Très bien ! Le plus important est de faciliter l'accès ouvert, quelle que soit la modalité retenue, tout en prenant des précautions concernant les revues avec frais de publication, en raison de leur coût.

La science ouverte inclut aussi l'ouverture des données de la recherche. Où en est-on de ce côté-là ?

Pour l'instant, c'est une sorte d'Himalaya. Le sujet de l'ouverture des données publiques – dont font partie les données de la recherche – est très récent : les principes fondateurs n'ont été établis qu'en décembre 2007, à Sebastopol, en Californie. Il faut en particulier que les données soient faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables – ce qui a donné l'acronyme FAIR. On se heurte au fait qu'il n'existe pas de tradition de partage des données de la recherche à la hauteur de la tradition de partage des publications scientifiques. Les premières revues scientifiques, dont l'objectif est le partage de la connaissance, datent du XVII[e] siècle – la première, *Le Journal des sçavans,* était d'ailleurs française ! Mais pour les données, qui sont pourtant la matière première de la connaissance, il n'y a pas une tradition et des pratiques aussi structurées.

FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS PHOTOTHÈQUE

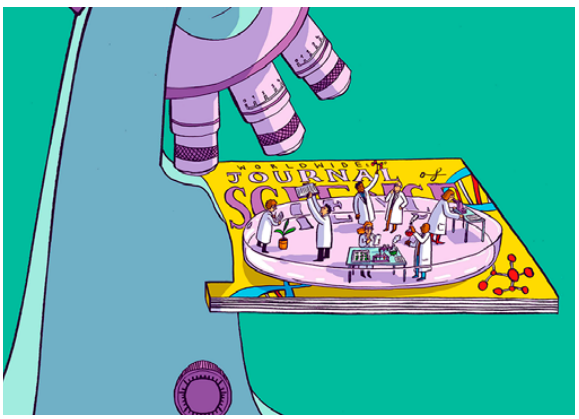
MARIN DACOS

INGÉNIEUR DE RECHERCHE au CNRS et agrégé d'histoire, Marin Dacos a créé en 1999 Revues.org, premier portail d'accès libre à des revues scientifiques en France. Puis il a lancé en 2011 la plateforme OpenEdition, qui regroupe Revues.org (devenu OpenEdition Journals) et trois autres portails de sciences humaines et sociales. Depuis 2017, il est conseiller pour la science ouverte auprès du directeur général de la recherche et de l'innovation (ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation).

Pourquoi vouloir ouvrir les données ?

Prenons l'exemple du Reproducibility Challenge – un défi lancé cette année par la revue *ReScience C,* consacrée à la recherche informatique –, dont le résultat doit être annoncé le 22 juin. Il s'agit de faire tourner des codes sources datant d'au moins dix ans, utilisés pour des résultats scientifiques •••

••• publiés à l'époque. Il peut s'agir d'analyse statistique, de simulation numérique ou encore de traitement de l'information. Il faut donc que les chercheurs retrouvent et comprennent à nouveau leur code source et le fassent fonctionner aujourd'hui. Cela paraît simple, mais ce sera probablement compliqué. Il en est de même pour les données, dont le contexte d'obtention, le champ de validité et les limites, autrement dit les « métadonnées » associées aux données, sont rarement documentés. Certes, le chercheur a ces paramètres en tête, mais tout repose sur sa mémoire. En fait, les premiers à bénéficier de l'ouverture des données, associées à des métadonnées de qualité, seront les chercheurs qui les ont produites, s'ils veulent les réutiliser des années après. Elles pourront aussi être utilisées par d'autres chercheurs, comme base de comparaison par rapport à leurs propres données ou comme matière première pour de nouvelles études. Enfin, en cas de résultats débattus des années plus tard, on pourra systématiquement les confronter aux données, ce qui est la seule façon de lever le doute.



▲ *Contrairement au partage des publications scientifiques, le partage des données de la recherche est une démarche récente.*

Depuis la loi de 2016, les données administratives sont ouvertes « par défaut », mais ce principe est assorti de diverses exceptions. Qu'en sera-t-il des données de la recherche ?

Elles sont concernées par la loi, donc ouvertes par défaut, mais avec des exceptions et surtout des degrés d'ouverture. En tant qu'historien, j'ai travaillé sur l'histoire de la photographie et, dans ce contexte, j'avais besoin de photos déposées dans les archives de la Justice. Ces archives sont protégées pendant cent ans mais le procureur de la République peut accorder, ou non, un droit d'accès au chercheur qui en formule la demande. En l'occurrence, j'ai pu y accéder. Il s'agit d'une situation intermédiaire, où les données ne sont ni ouvertes ni fermées : elles sont partagées, au sens où il y a une règle qui explicite quel est le droit, qui arbitre et selon quelle procédure on peut y avoir accès. Selon la loi, les données de la recherche financée sur fonds publics doivent être ouvertes par défaut, avec certaines exceptions, comme le secret-défense, le secret industriel ou le secret médical. Ces données qu'on ne pourra pas « ouvrir » seront, quand ce sera possible, « partagées », avec des conditions d'accès strictement encadrées.

En pratique, comment rendre les données accessibles ?

D'une part, il faut développer le métier d'éditeur de données au sein des laboratoires. On ne peut pas demander aux chercheurs de tout faire, parce que c'est chronophage, et parce que la personne qui a obtenu les données n'est pas forcément la mieux placée pour documenter à destination d'autrui quelque chose qui, pour elle, est évident. D'autre part, il faut développer des services techniques, par exemple des plateformes où seront stockées les données – on appelle cela des entrepôts. Les disciplines qui relèvent des *big sciences* – comme la génétique avec son volet séquençage, l'astronomie, ou encore les humanités numériques – sont déjà structurées autour des données : elles ont défini un état de l'art sur les bonnes pratiques, les normes, la citation des données, et elles ont déjà leurs entrepôts de données, en général en accès ouvert. Mais 80 % des disciplines n'entrent pas dans ce champ et ont besoin d'acquérir ces compétences. Il n'est pas question de leur dire quoi faire, mais plutôt de les appuyer dans la démarche qu'elles décideront d'adopter.

LE CORONAVIRUS, UN EXEMPLE D'ACTUALITÉ

L'essentiel des articles portant sur le Covid-19 est désormais en accès ouvert, par une volonté commune des chercheurs et des éditeurs. Cependant, dès que l'on s'éloigne de l'objet Covid-19 stricto sensu, les taux d'accès ouvert varient considérablement. Des chercheurs ont ainsi identifié 13 000 articles sur les coronavirus depuis la fin des années 1960 et constaté qu'à peine un sur deux est ouvert (1). Ils ont aussi montré que ces articles faisaient appel, dans leurs références bibliographiques, à un savoir qui est par nature « intrinsèquement interdisciplinaire », les 200 000 références mobilisées étant issues de nombreux champs de la connaissance, de la gériatrie aux sciences vétérinaires, dont un tiers seulement concerne directement les coronavirus. De même, les connaissances en santé publique, en économie de la santé, en sociologie de la santé, en géographie ou droit de la santé sont probablement encore moins disponibles que celles portant sur la médecine et la biologie. En France, on estime le taux d'ouverture des sciences humaines et sociales à 38,8 %, mais nous ne disposons pas à ce jour d'éléments chiffrés portant sur les sciences humaines et sociales de la santé. Source de satisfaction : le taux d'accès ouvert des chercheurs français (49 %) est bien supérieur au taux moyen européen (36 %). M. D.

(1) tinyurl.com/Covid19-lacunes-communication

DROITS RÉSERVÉS

C'est la raison pour laquelle nous soutenons la Research Data Alliance, créée en 2013 par la Commission européenne et la National Science Foundation américaine (entre autres). Cette alliance internationale regroupe aujourd'hui des milliers de chercheurs et de spécialistes des données, dont la mission est de créer des passerelles sociales et techniques au sein de la communauté scientifique, afin de permettre un partage des données de la recherche.

Les entrepôts de données sont plutôt destinés à stocker les données brutes. Qu'en est-il des données déjà « traitées », par exemple celles qui sous-tendent telle ou telle courbe ou carte dans les publications ?

Il est tout aussi indispensable de les ouvrir car, en l'absence de ces données, on doit « deviner » les valeurs qui sont derrière les graphiques, ce qui est imprécis et inefficace. La solution la plus pratique est de le faire au moment de la publication : qu'à chaque courbe, graphe ou carte corresponde un tableau de données fourni en un format réutilisable (csv, Excel…). Ce type de pratique est déjà généralisé dans certaines disciplines comme l'économie, il faut l'étendre.

Qu'il s'agisse des publications ou des données, la science ouverte modifie notablement les pratiques. Ne faut-il pas en tenir compte dans la façon dont les chercheurs sont évalués ?

C'est même indispensable, si l'on veut que la science ouverte soit un succès ! Les chercheurs sont recrutés et promus sur la base de règles datant du XXe siècle. On s'appuie sur des approximations : la publication, dont on considère qu'elle résume l'ensemble de l'activité du chercheur ; et le facteur d'impact de la revue accueillant cette

> **« Aujourd'hui, les chercheurs sont recrutés et promus sur la base de règles datant du XXe siècle »**

publication, qui est une mesure indirecte de la façon dont l'ensemble des articles qu'elle publie est cité par d'autres articles. En 1970, le facteur d'impact était un outil très puissant, puisque c'était la première fois que l'on savait résumer la visibilité d'une revue avec des mesures statistiques. Mais le facteur d'impact parle de la revue en tant que marque historique, et ne dit pas grand-chose de l'impact ou de la qualité des articles eux-mêmes. Par ailleurs, en raison de critères linguistiques et commerciaux, des milliers de revues de très grande qualité sont exclues du Web of Science, le service commercial sur lequel s'appuie le facteur d'impact. C'est pour cela que la France soutient, via l'Agence nationale de la recherche, la déclaration de San Francisco sur l'évaluation de la recherche, dite déclaration Dora. Publiée en 2013, aujourd'hui signée par 1893 organisations et 15 651 chercheurs à titre individuel, elle stipule que le facteur d'impact est une mesure qui doit être abandonnée, en particulier pour l'évaluation des individus, et que l'on doit aller vers une évaluation plus qualitative, prenant en compte plus de types de production scientifique que les publications.

▲ *Créé dans les années 1970, le facteur d'impact calcule la visibilité de chaque revue scientifique. Mais il n'évalue pas la qualité des articles.*

Encore faut-il éviter de reproduire, dans l'univers de la science ouverte, la course au nombre de publications qui existe dans bon nombre de disciplines…

Tout à fait. Il faut augmenter la proportion des publications en accès ouvert, mais réduire la course au nombre de publications. C'est difficile, parce que l'évaluation des chercheurs a une dimension très internationale. Mais le fait que la déclaration Dora vienne des biologistes, qui sont les plus inféodés au facteur d'impact et au « *publish or perish* », est encourageant. Et le fait que tous les organismes de recherche français aient signé Dora l'est aussi. Cela signifie qu'au moins, le diagnostic fait consensus.

Comment valoriser l'implication des chercheurs et des autres professionnels dans l'accès ouvert des données et des codes sources ?

Il faut déjà que ceux qui produisent du code ou gèrent des données ne soient pas invisibilisés. Par exemple, il est honteux que des données accumulées et structurées pendant des années par une personne ou une équipe soient utilisées par d'autres sans que jamais leur origine ne soit citée. D'où l'intérêt de la norme Contributor Roles Taxonomy (CRediT), née à l'issue d'un séminaire organisé en 2012 par l'université Harvard, et d'abord expérimentée par les éditeurs du domaine biomédical. Elle développe la notion de « contributeurs » en remplacement d'« auteurs », et demande que chaque signataire d'un article soit mentionné pour un ou plusieurs types de contributions parmi quatorze possibles – dont le traitement des données (2). Depuis 2015, de plus en plus de revues l'adoptent, et c'est une excellente chose. Car avec la visibilité vient la reconnaissance du travail accompli. Et avec la reconnaissance vient l'adhésion aux pratiques d'ouverture de la science. ■

Propos recueillis par Cécile Klingler

(1) tinyurl.com/barometre-science-ouverte
(2) casrai.org/credit

DR

Quand la machine du sommeil se grippe

La peste, la grippe espagnole et aujourd'hui le Covid-19 sont des épidémies qui marquent la vie des hommes. Bien que leurs conséquences immédiates soient évidentes, et parfois dramatiques, elles ont aussi un impact à long terme sur les individus, voire sur l'espèce. En effet, la descendance de ceux qui y survivent hérite d'un bagage génétique plus favorable, offrant une résistance accrue à l'infection au niveau de la population.
Dans certains cas, plus rares, la réponse immunitaire des malades peut avoir des conséquences indirectes désastreuses. C'est le cas pour la grippe. Celle-ci peut provoquer des troubles de la régulation de l'éveil et du sommeil : la narcolepsie.

DÈS 1917, Constantin von Economo, neurologue et psychiatre autrichien, décrit une épidémie de ce type. Les patients présentent une « encéphalite léthargique », un trouble du mouvement et du sommeil, qui fait que certains restent immobilisés dans des postures statuaires. Dans les années 1970, le médecin et écrivain britannique Oliver Sacks étudiera ces patients et en tirera un livre, *L'Éveil,* magnifiquement interprété à l'écran par le duo Robert De Niro et Robin Williams. Bien que l'origine de cette épidémie reste mystérieuse, tout comme sa fin abrupte en 1926, elle fut certainement d'origine virale. L'explosion du nombre de cas à la suite de la grippe espagnole de 1918 suggère une interaction entre les deux infections. Les patients touchés présentaient des lésions cérébrales, notamment dans l'hypothalamus, dont le rôle de régulateur des cycles d'éveil et de sommeil a, depuis, été clairement établi.

Revenons à la narcolepsie. Dans les années 1990, des neurobiologistes découvrent l'orexine (ou hypocrétine), un neuromodulateur sécrété par les neurones de l'hypothalamus et nécessaire au maintien de l'éveil. Une perte de 80 % de ces neurones provoque une narcolepsie avec, entre autres symptômes, une hypersomnolence. Pour comprendre les relations entre cette pathologie et l'épidémie de grippe, Emmanuel Mignot, spécialiste de la narcolepsie à l'université Stanford, aux États-Unis, a dénombré mois par mois pendant dix ans l'apparition de cas chez des enfants chinois au cours des années 2000. Résultat : la courbe fluctue chaque année, suggérant une apparition saisonnière. À chaque fois, le pic d'apparition des symptômes suit de 4 à 6 mois celui du pic d'infection par la grippe. À cet égard, l'année 2010 se distingue des autres par une explosion du nombre de cas de narcolepsie, précisément les mois qui ont suivi la grande épidémie de grippe H1N1 (1).

> **« Après l'épidémie de grippe H1N1, le nombre de cas de narcolepsie a explosé »**

Comment l'expliquer ? Lorsque le corps est infecté, le système immunitaire apprend à reconnaître les antigènes (composés extérieurs au corps) qu'il doit éliminer. Or il arrive que certains antigènes ressemblent à une protéine qui est synthétisée dans le corps. Normalement, le système immunitaire s'en rend compte et inhibe cette réponse, mais parfois ce mécanisme de protection échoue. Les conséquences sont potentiellement graves et peuvent aboutir au développement d'une maladie auto-immune : le corps se met alors à attaquer les cellules qui expriment la protéine ressemblant à l'antigène ! Dans le cas de la narcolepsie, le système immunitaire s'attaque aux neurones sécrétant l'orexine qui, justement, ressemble à l'un des antigènes de la grippe.

LA RELATION que nous entretenons avec les virus ne s'arrête pas à la maladie qu'ils peuvent provoquer, ni même aux cas plus complexes de maladies auto-immunes. Nous avons apprivoisé les plus dangereux grâce aux vaccins, mais il en existe des milliers d'autres. On peut se demander si la réaction de notre corps à ces infections extérieures n'a pas le potentiel de changer des aspects de notre personnalité ou d'affecter certaines fonctions physiologiques et cognitives, pourquoi pas même de les améliorer. Des pans entiers de notre génome sont probablement d'origine virale, traces plus ou moins ancestrales d'insertion d'ADN étranger dans nos chromosomes. Souvenons-nous donc que, si quelques-uns de ces virus ont un pouvoir de nuisance terrible, nous vivons en harmonie avec de nombreux autres.

(1) F. Han *et al., Sleep, 34,* 627, 2011.

Adrien Peyrache est neuroscientifique à l'université McGill, au Canada, où il dirige un laboratoire de recherche.
● Cette chronique est proposée en alternance avec celle de Mariana Alonso, de l'Institut Pasteur.

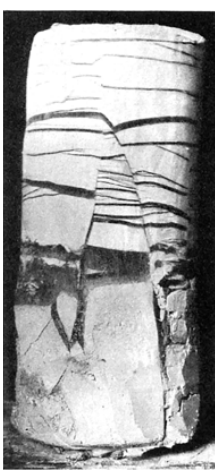
DR

L'étonnant pouvoir sculptant de la glace

Au début du XX^e siècle, le géologue américain Stephen Taber a mené des recherches sur la glace, dont il cherchait à limiter les ravages sur les infrastructures des pays froids. Le physicien Sylvain Deville puise aujourd'hui une partie de son inspiration dans ces travaux pour mettre au point des matériaux microporeux.

Il y a un siècle, le géologue américain Stephen Taber tentait de percer le mystère du *frost heaving* – le soulèvement du sol par le gel – en menant des expériences dans son jardin de Caroline du Sud. Il était alors loin d'imaginer que ses recherches inspireraient la création de matériaux poreux, utilisés aujourd'hui comme substituts osseux, dans des systèmes électrochimiques (batteries, piles à combustible, supports de catalyse), ou encore dans certains dispositifs de filtration et d'isolation thermique. Pour Sylvain Deville, directeur de recherche CNRS en sciences des matériaux à l'Institut lumière matière de l'université de Lyon, les travaux de Stephen Taber ont été décisifs. En particulier, son article « Frost heaving » paru en 1929 dans la revue *The Journal of Geology* (1). *« Il s'agit d'un article fondateur dans ma discipline. Il renferme une quantité stupéfiante de résultats. Avec toute cette matière, il y aurait de quoi en publier trois de nos jours ! »* s'amuse le physicien, qui salue la *« persévérance incroyable »* dont a fait preuve Taber au cours des quinze années séparant ses premières expérimentations de la publication de son article. Une investigation sur le temps long, inimaginable dans le fonctionnement actuel de la recherche.

« Dans les régions froides, le frost heaving *est un fléau qui ravage les routes et les bâtiments,* indique Sylvain Deville. *Le but originel de Taber était donc de comprendre comment ont lieu ces brusques modifications de terrain, pour mieux les contrer. »* Le phénomène se caractérise par l'accumulation de glace dans le sol. Pour le reproduire, le géologue américain a analysé, entre 1914 et 1915, des carottes composées de divers sédiments qu'il a exposées au froid hivernal tout en contrôlant leur composition et leur densité, la température, la vitesse de refroidissement, la pression, etc. Il constate ainsi que les cristaux de glace n'ont pas le même comportement selon la nature des sédiments. Par exemple, ils exercent une pression formant des cavités dans l'argile, mais pas dans le sable.



▲ *Stephen Taber a comparé les propriétés de carottes sédimentaires à basse température pour expliquer le soulèvement du sol par le gel.*

DR

Dans un congélateur

Pourquoi une telle différence ? L'analyse devra attendre, car Stephen Taber ne dispose pas des ressources suffisantes pour équiper son laboratoire d'un congélateur proportionné à ses expériences. Plus de dix ans après, en 1927, le vent tourne grâce à un don du représentant commercial local de la société Frigidaire. Avec l'équipement adéquat, le géologue parvient à montrer expérimentalement que ces cavités se forment d'autant plus facilement que les particules du sol sont fines.

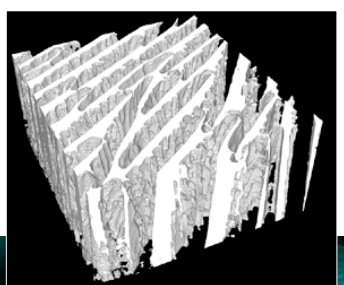
Au préalable, le scientifique va tester plusieurs hypothèses pour expliquer le *frost heaving,* en commençant par la plus répandue : lorsque l'eau liquide se transforme en glace, son volume augmente, entraînant le soulèvement du sol. L'eau étant le seul solvant dont le volume augmente quand il devient solide, Taber a l'idée de le comparer au xylène, qui gèle à des •••

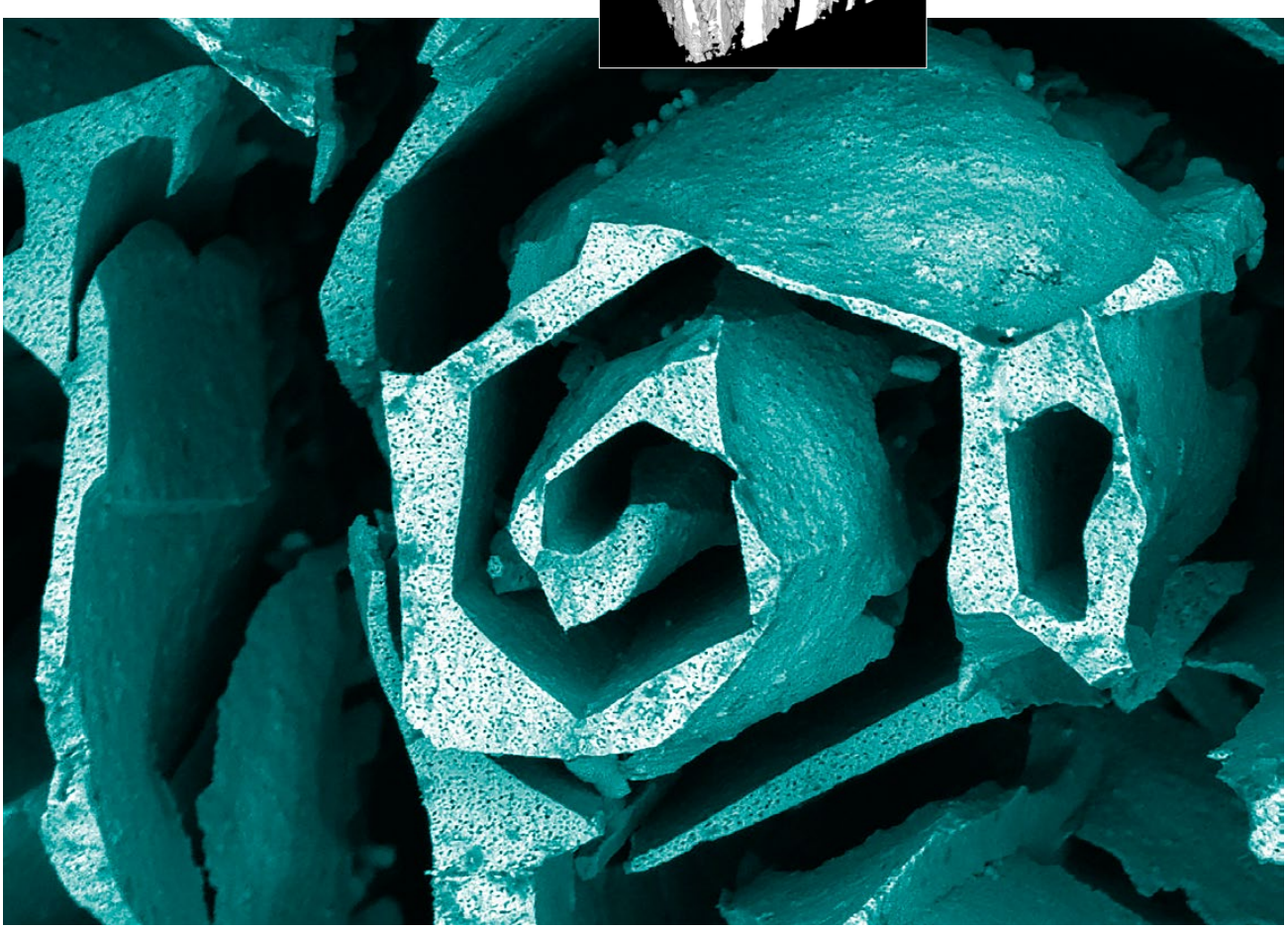
Contexte

Les scientifiques sont des nains sur des épaules de géants. Les idées qui germent dans leur esprit s'appuient le plus souvent sur des concepts qui ont été établis par leurs prédécesseurs. L'étude du soulèvement du sol par le gel (*frost heaving* en anglais), fléau qui ravage les routes et les bâtiments dans les régions froides, illustre cette dynamique.

••• températures accessibles expérimentalement (et dont le volume diminue lorsqu'il gèle). Résultat : dans les deux cas, les mêmes effondrements du sol ont lieu. Il observe par ailleurs que l'augmentation du volume d'eau est supérieure à la simple augmentation théorique due à la solidification. Il doit donc y avoir un apport en glace provenant d'une autre source.

Cela l'amène à inférer la présence d'eau liquide dans le sol, qui serait acheminée vers la couche de glace en surface. Une idée d'autant plus crédible qu'avant lui, les géologues George J. Bouyoucos, de l'université du Michigan, et Adolph M. Wintermyer, du Bureau of Public Roads des États-Unis, ont apporté la preuve que l'eau reste liquide d'autant plus longtemps que les espaces capillaires sont restreints. Et effectivement, le géologue observe que de l'eau sous forme liquide est attirée vers la couche de glace en surface. Comment l'eau congelée arrive-t-elle à « pomper » l'eau liquide des profondeurs ? *« Taber fait la proposition qu'un film liquide très fin se forme autour des particules composant le sol,* détaille Sylvain Deville. *Ainsi, même lorsque le sol est congelé, il reste toujours ce que l'on appelle un "film pré-fondu", au sein duquel l'eau liquide peut, par capillarité, circuler à travers le sol et alimenter la glace en surface. Si les températures hivernales s'installent suffisamment longtemps, cela donne lieu à des accumulations de glace très importantes. »*





▼ *La technique de texturation à la glace* (ice-templating) *permet d'obtenir des matériaux poreux à porosité contrôlée.*

SYLVAIN DEVILLE / LSFC / CNRS PHOTOTHÈQUE

Des hypothèses validées

Toutefois, la glace n'est pas en soi responsable de la fragilisation des sols. C'est l'eau liquide qui, en remontant vers la surface, crée des interstices, lesquels, à terme, peuvent devenir des cavités. Après le dégel, ces poches se vident de leur glace et le sous-sol se transforme en gruyère, entraînant parfois des affaissements inattendus.

Afin d'étudier la formation de ces cavités, Taber teste des carottes de différentes compositions, allant du sable à l'argile. Il étudie ainsi l'influence de la dimension des particules, la taille des espaces entre ces particules (la porosité), le gradient de température, la vitesse

de refroidissement, la pression, la teneur en eau dans le sol, etc., pour comprendre le mécanisme à l'œuvre. Il observe notamment que le phénomène se produit plus facilement si le diamètre des particules est inférieur à 1 µm. De même, le soulèvement des sols est d'autant plus fort que la quantité d'eau dans le sol est importante. Le géologue remarque aussi que l'eau gèle moins facilement dans de petites cavités et peut même s'y retrouver à l'état liquide en dessous de 0 °C. *« Toutes les hypothèses proposées par le géologue sur la présence de films liquides dans les sols congelés et sur le mouvement de l'eau à travers le sol peuvent se généraliser à tout cristal en croissance en interaction avec des particules »,* affirme Sylvain Deville.

Le mécanisme de création d'interstices a été détourné pour créer des matériaux microporeux

Aujourd'hui, les chercheurs en sciences des matériaux poursuivent et peaufinent les réflexions de Taber. L'équipe de Sylvain Deville s'est ainsi aperçue de l'inexactitude de certaines prédictions du géologue. Taber prévoyait par exemple que les films pré-fondus ne pouvaient mesurer plus de quelques nanomètres d'épaisseur. Or, plus ces films sont fins, plus la pression doit être importante pour que l'eau puisse circuler. En 1929, le géologue n'avait pas pris cela en compte. Sylvain Deville et ses collègues ont découvert que les films pré-fondus faisaient en réalité quelques micromètres d'épaisseur, notamment grâce à la présence dans l'eau de certains solutés comme le sel. En effet, lorsqu'ils se trouvent en excès dans l'eau, ces solutés se déposent entre la matière et le film d'eau, formant une paroi qui permet au film de s'épaissir et de se renforcer. De quoi alimenter la glace avec une pression d'eau moins importante. *« Même si l'on peut discuter de l'ordre de grandeur, il est extraordinaire de constater que la description en elle-même reste valide, alors que les déductions de Stephen Taber se fondaient sur des observations très macroscopiques car il ne disposait pas des outils de microscopie actuels,* commente Sylvain Deville. *Mais cela traduit le fait qu'avec des expériences simples, il savait exactement quel effet il voulait observer. En contrôlant avec précision les paramètres macroscopiques, il a tiré des conclusions sur ce qu'il se passe à des échelles très locales et microscopiques ! »*

▲ *Après le dégel, l'eau liquide remonte à la surface et forme des cavités qui peuvent s'effondrer.*

ROBERT VALARCHER / BIOSPHOTO

Une réplique des cristaux

Ces analyses ont des retombées inattendues en sciences des matériaux. Les chercheurs ont en effet eu l'idée de détourner le mécanisme de création d'interstices pour créer des matériaux microporeux. *« Nous avons mis au point une technique utilisant la congélation de particules non solubles en suspension dans l'eau. La glace ainsi formée repousse et concentre les particules entre les cristaux de glace,* explique Sylvain Deville. *On élimine ensuite cette glace par sublimation* [passage de l'état solide à l'état gazeux, NDLR] *et on obtient un matériau dont les trous sont une réplique des cristaux* (2). » Cette technique de fabrication pourrait être utilisée en médecine pour les substituts osseux, dans l'industrie chimique et même… pour la création de pastilles poreuses de cacao !

15 %

C'EST LA CONCENTRATION EN PARTICULES sur laquelle travaille l'équipe CNRS de Sylvain Deville.

Si le mécanisme sous-jacent est très proche de celui qui est décrit par Taber, la concentration en particules utilisée par l'équipe de Sylvain Deville est en revanche bien plus faible : 15 % du volume total, contre 50 % dans les sols étudiés par le géologue. Cela permet aux particules de mieux se réorganiser sous l'effet de la croissance des cristaux. Qu'un mécanisme géologique macroscopique, mis en évidence il y a près d'un siècle avec des moyens très limités, puisse inspirer une équipe de recherche française en sciences des matériaux est éloquent. Cela souligne à quel point la recherche ne connaît pas de frontière. Ni temporelle, ni géographique, ni disciplinaire. ■

Martin Clavey

(1) S. Taber, *The Journal of Geology, 37,* 428, 1929.

(2) S. Deville *et al., Science, 311,* 515, 2006.

Une lentille au secours des marins

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique

Le Français Augustin Jean Fresnel est bien connu des théoriciens pour ses travaux sur la nature ondulatoire de la lumière. Mais ce physicien du début du XIXe siècle est également l'inventeur d'une lentille à échelons, qui équipe aujourd'hui encore les phares du littoral.

AGRÉGÉE DE PHYSIQUE

À travers ses livres, cette normalienne passionnée de vulgarisation scientifique cherche à faire connaître les sciences par l'approche historique ou l'anecdote.

Face à l'intensification des échanges commerciaux du début du XIXe siècle, la signalisation maritime française doit être développée et repensée. Afin de répondre aux besoins de la navigation, le directeur général du corps des Ponts et Chaussées crée, en avril 1811, la Commission des phares. Sa mission ? Améliorer le système d'éclairage des côtes françaises, bien moins performant que celui du Royaume-Uni. En 1813, l'astronome, physicien et homme politique François Arago rejoint l'équipe, composée de savants, de marins et d'ingénieurs. Six ans plus tard, nommé président de la Commission, Arago appelle auprès de lui un cousin de l'écrivain Prosper Mérimée, le physicien Augustin Jean Fresnel, qui s'est distingué par ses travaux sur la diffraction et la polarisation de la lumière.

En ce début du XIXe siècle, le système d'éclairage des phares côtiers est basé sur des réflecteurs constitués de miroirs paraboliques tournants, au foyer desquels se trouve une lampe à huile. Bien qu'ayant l'avantage d'envelopper le système éclairant, les miroirs argentés présentent de multiples inconvénients. Ils sont difficiles à fabriquer et à entretenir, sont encombrants et se ternissent rapidement sous l'influence des brouillards salins. Ainsi, les miroirs les mieux polis renvoient à peine 50 % de la lumière émise.

Dès l'été 1819, Fresnel songe à remplacer les réflecteurs métalliques par des lentilles optiques, dont le verre est inaltérable et l'entretien plus facile. Cependant, pour être adaptées au service des phares, les lentilles doivent être assez grandes pour capter l'essentiel du flux lumineux et suffisamment bombées pour rabattre les rayons vers l'horizon.

Amincir le verre

Or une lentille ordinaire répondant à ces caractéristiques serait très épaisse au centre, ce qui absorberait une bonne partie de la lumière émise malgré la transparence du verre. En outre, sa réalisation serait délicate, tant au niveau du coulage de grandes masses de verre que pour assurer une courbure régulière et un poli irréprochable. Et, à supposer que l'on puisse obtenir une masse de verre homogène et exempte de défauts, son poids serait considérable, ce qui mettrait à rude épreuve les rouages destinés à faire tourner le système d'éclairage et entraînerait sa destruction prématurée. Le 29 août 1819, Fresnel présente la solution qu'il préconise pour alléger la lentille et

Contexte

Dans la première partie du XIXe siècle, les besoins de la navigation ont entraîné la recherche de systèmes d'éclairage propres à améliorer la portée des phares. La mise au point de sources lumineuses de forte intensité s'est accompagnée de l'élaboration d'optiques performantes destinées à en optimiser le rendement.

DR

▲ *Le phare de Cordouan, en Gironde, a accueilli la première optique de Fresnel en 1823. Le dispositif d'origine a été modernisé depuis.*

remédier aux inconvénients précédents. La déviation des rayons lumineux s'effectue à la séparation entre l'air et le verre. De ce fait, elle ne dépend pas de l'épaisseur du verre mais uniquement de sa courbure. Si l'on parvenait à diminuer l'épaisseur de la lentille, en ne conservant que les surfaces utiles à la réfraction et la partie nécessaire à la cohésion du système, on en réduirait à la fois le volume, la masse et le coût.

Fresnel propose de « découper » une lentille classique en anneaux concentriques

Pour ce projet, Fresnel propose de travailler et amincir le verre par échelons, sur la base du « découpage » d'une lentille classique en anneaux concentriques autour d'un ménisque central. Une fois la masse de verre superflue ôtée de chaque anneau, la surface de la lentille présente une structure en escalier. En réglant l'inclinaison et la courbure des diverses marches, qui peuvent être fabriquées séparément avant d'être assemblées, il est également possible de corriger l'aberration dite de sphéricité. Ce défaut optique fait que les rayons émanant du foyer et passant par les bords de la lentille n'émergent pas parallèles aux autres.

En réalité, l'idée d'une lentille à échelons n'était pas nouvelle. Dès 1748, alors qu'il cherchait à augmenter la puissance des verres ardents utilisés pour concentrer les rayons du Soleil, en vue d'obtenir les hautes températures nécessaires aux expériences de combustion à distance, le savant Buffon avait imaginé de creuser un bloc de verre en anneaux concentriques ramenés chacun à la plus petite épaisseur possible. Mais tailler une optique de grandes dimensions dans une seule masse de verre s'était révélé impossible. Par la suite, le mathématicien Condorcet avait suggéré la possibilité d'exécuter séparément les différents morceaux de la lentille, mais aucune réalisation à grande échelle n'avait suivi.

▲ *Ingénieur et physicien, Augustin Jean Fresnel (1788-1827) est l'un des fondateurs de l'optique moderne.*

Pour mener à bien son programme, Fresnel contacte le maître verrier François Soleil, qu'il présente à la Commission des phares. Celle-ci donne le feu vert à la construction d'une première lentille dès octobre 1819. Les opticiens de •••

MANUEL COHEN / AURIMAGES - SCIENCE PHOTO LIBRARY / SHEILA TERRY

••• l'époque n'étant pas en mesure de fabriquer des surfaces en forme d'anneaux, Soleil est contraint, provisoirement, de substituer à chaque surface annulaire un assemblage de petites portions polygonales. Travailler les morceaux de verre en ligne droite est en effet plus aisé que de les façonner en arc de cercle.

Malgré sa teinte verdâtre, le choix se porte sur un verre de type crown, composé de 72 parties de silice, 12 de soude et 16 de chaux, avec des traces d'alumine et d'oxyde de fer. Quasi inaltérable à l'air, quasi exempt de bulles et de stries, il est plus dur, plus résistant et surtout plus léger que le verre traditionnel à l'oxyde de plomb. Sur les conseils d'Arago, l'assemblage des divers éléments au sein d'une armature métallique est effectué au moyen d'une colle de poisson qui adhère fortement au verre.

Le 12 mai 1820, à l'Observatoire de Paris, Fresnel fait fonctionner avec succès une lentille à échelons de 55 cm de côté et 70 cm de distance focale. Le 31 octobre de la même année, fort de cette réussite, le physicien soumet à la Commission des phares un projet d'appareil lenticulaire à feux tournants, composé de huit lentilles à échelons de 92 cm de distance focale, inscrites dans des panneaux carrés de 76 cm de côté et entourant une source lumineuse unique. D'une épaisseur maximale de 3,7 cm, dotées de six échelons du centre au milieu de chaque côté, et dix du centre aux angles, elles embrassent chacune un angle de 45° dans les deux sens. Leur masse, du même ordre que celle des réflecteurs en usage, est estimée à 74 livres (37 kg), sans compter les cadres de cuivre qui en ceignent le contour et les pièces de fer destinées à les réunir à l'axe de rotation. Dans la soirée du 13 avril 1821, une lentille à échelons et deux projecteurs paraboliques, parmi les plus performants de l'époque, sont installés sur les toits de l'Observatoire de Paris, avec une lampe à huile appropriée.

▲ *La lentille à échelons conçue par Fresnel avec le concours du maître verrier François Soleil.*

La Commission des phares au grand complet, accompagnée d'un comité de marins, s'installe à l'autre bout de la ville, au sommet de la colline de Montmartre, pour juger de l'effet produit par les appareils en compétition. Certain du résultat, Arago a convié les constructeurs des deux réflecteurs, Étienne Lenoir et Isaac Bordier-Marcet. Comme il le prévoyait, l'expérience confirme la supériorité du système lenticulaire de Fresnel sur les technologies concurrentes. Louis Becquey, directeur général des Ponts et Chaussées, se déclare enthousiasmé par une réalisation propre à sauver les vies de milliers de marins tout en damant le pion aux ingénieurs britanniques.

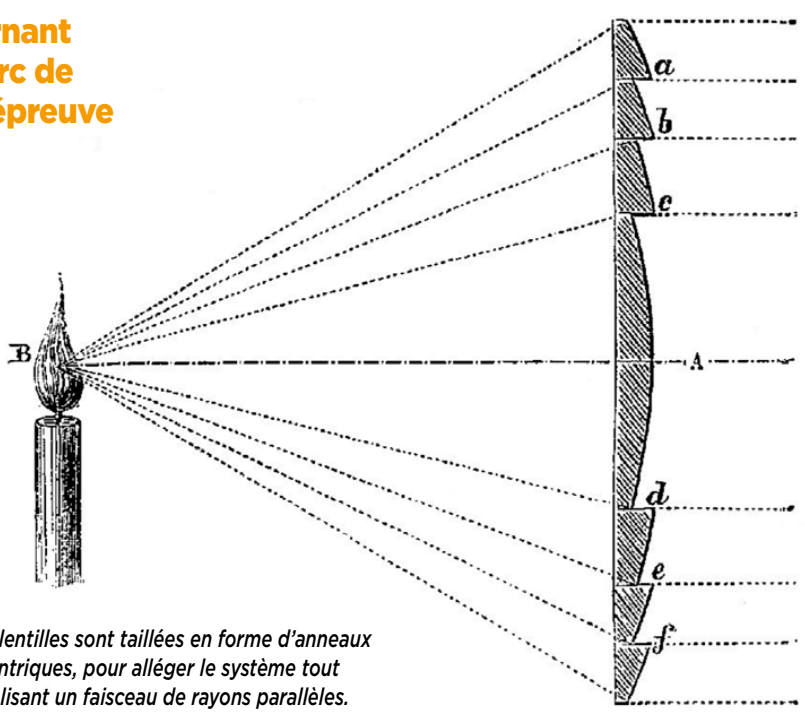
Quelques mois plus tard, dans la nuit du 7 au 8 septembre 1821, Fresnel vérifie l'efficacité à longue distance d'un ensemble complet de plusieurs lentilles.

Franc succès à Paris

Un appareil à feux tournants est placé sur la plateforme supérieure de l'arc de triomphe de l'Étoile, alors en construction. Les témoins, qui se sont rendus dans le village de Châtenay, distant de 13 000 toises (25 km) de ce monument, voient briller la lumière de l'appareil dont l'éclat, selon Arago, est comparable à celui que l'on obtiendrait *« en rassemblant le tiers de la quantité totale des lampes à gaz qui tous les soirs éclairent les rues, les magasins et les théâtres de Paris »*.

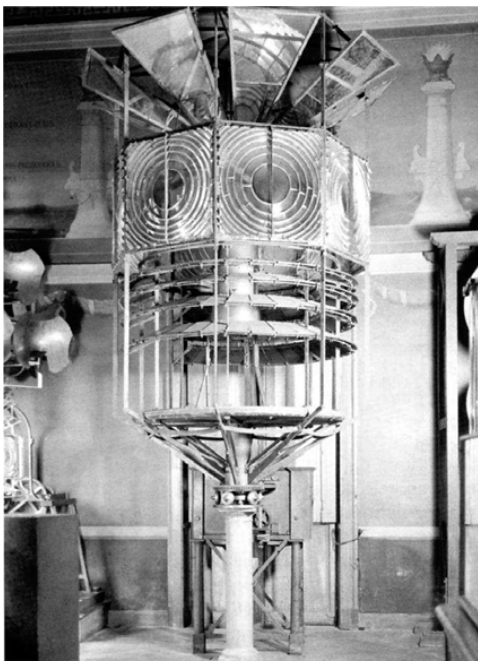
Mais déjà Fresnel travaille à la mise au point d'une structure destinée à équiper le phare de Cordouan, situé à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde, le plus ancien en activité et le plus prestigieux des phares français (classé monument historique, il vient d'être proposé au patrimoine mondial de l'Unesco).

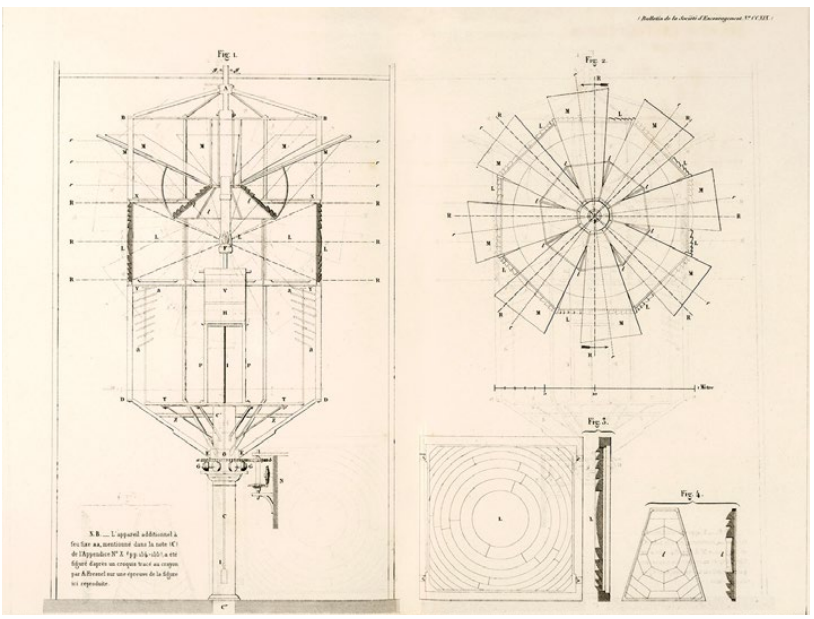
Le 20 août 1822, le feu tournant est placé au sommet de l'Arc de triomphe pour une ultime épreuve



▲ *Les lentilles sont taillées en forme d'anneaux concentriques, pour alléger le système tout en réalisant un faisceau de rayons parallèles.*

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM/PHOTO STUDIO CNAM - BNF, PARIS





À gauche : la première optique opérationnelle, installée à Cordouan. Les premiers phares bénéficiant de cette innovation étaient équipés de 4, 8 (ou plus) lentilles de Fresnel de section carrée. À droite : le dispositif tel qu'il est décrit dans un ouvrage de Fresnel publié en 1822.

Fin 1821, Fresnel avait trouvé un procédé mécanique permettant d'exécuter aisément et à moindre coût les surfaces annulaires, à partir de grands arcs de verre coulés dans des moules, fournis par la manufacture de Saint-Gobain. En réduisant le nombre de morceaux de verre utilisés, on diminuait à la fois les pertes de lumière et la fragilité du système.

Avant d'être transporté à Bordeaux, le feu tournant de Fresnel est placé au sommet de l'Arc de triomphe pour une ultime épreuve, comportant le réglage de la vitesse de rotation de l'optique (d'un tour toutes les huit minutes à un tour toutes les six minutes). Au soir du 20 août 1822, les membres de la Commission des phares et le roi Louis XVIII, dont on avait spécialement attendu le retour à Paris un mois durant, prennent place sur la butte de Montmélian, dans l'Oise, à 200 m d'altitude et 16 400 toises (32 km) de la capitale. À nouveau, le succès est au rendez-vous : malgré des conditions météorologiques défavorables, *« les éclats ont paru très brillants »*. Arago et Fresnel s'étaient attachés à augmenter l'intensité de la flamme éclairante en concevant une lampe à huile dont le bec était garni de quatre mèches concentriques, d'après une idée du physicien américano-britannique Lord Rumford.

Une portée inégalée

Celui-ci avait remarqué que la lumière produite par deux bougies augmentait d'intensité lorsqu'elles étaient suffisamment proches pour que leurs flammes se réunissent. L'injection permanente d'un excès d'huile sous pression, via un ingénieux mécanisme de pompe aspirante et refoulante, prévenait la rapide carbonisation des mèches, empêchait l'huile d'entrer en ébullition et écartait les flammes du bec. Le feu central pouvait ainsi brûler jusqu'à quatorze heures d'affilée sans qu'il soit nécessaire de couper l'extrémité des mèches.

Le 20 juillet 1823, à Cordouan, l'optique de Fresnel succède aux douze miroirs paraboliques d'Étienne Lenoir. La lumière, dont les marins de Royan louent *« la vivacité et la blancheur »*, est perçue jusqu'à 7 lieues marines, soit 39 km, au lieu des trois ou quatre lieues habituelles. Un système de rouages conçu par l'horloger Henri Wagner assure la rotation de l'optique. Huit cônes lumineux balaient ainsi successivement l'horizon, donnant son rythme au phare.

Pour accroître la durée des éclats, jugée trop brève si on la compare aux intervalles obscurs les séparant, huit lentilles additionnelles en forme de trapèze recueillent les rayons passant au-dessus des lentilles et les projettent sur de grands miroirs plans qui les renvoient vers l'horizon. Par la suite, des couronnes catadioptriques, dont Fresnel avait eu l'idée, mais qui n'avaient pas pu être exécutées de son vivant, faute d'outillage adapté, sont venues remplacer ce dernier dispositif par trop encombrant. Les sources lumineuses, de leur côté, ont gagné en puissance et en compacité : les lampes à halogènes et à LED ont détrôné les lampes à huile. Et si les phares ont basculé dans l'ère de l'informatique et de l'automatique, les lentilles de Fresnel sont restées, pour l'heure, sans rivales. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- Vincent Guigueno, *Les Phares. Gardiens des côtes de France*, Gallimard, 2012.
- **http://journals.openedition.org/bibnum/733** Vincent Guigueno, « Les lentilles à échelons de Fresnel », Bibnum, Physique, 2008.
- Augustin Fresnel, *Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares*, Imprimerie royale, 1822.

ARCHIVES NATIONALES/ARCHIVES PHARES ET BALISES - SCIENCE PHOTO LIBRARY / KING'S COLLEGE LONDON

Cambriolages et taches de léopards

Quel est le lien entre la recrudescence des cambriolages et la présence de taches sur le pelage des léopards ? Je ne sais pas si cette question admet vraiment une réponse sensée ou si elle est définitivement absurde. Toutefois, quelques spécialistes de mathématiques appliquées pourraient répondre qu'il existe, pour ces deux phénomènes, des modèles reposant sur des équations proches, formant ce que l'on appelle un système à réaction-diffusion.

Initialement, ces systèmes d'équations aux dérivées partielles servaient à décrire l'évolution de la concentration en réactifs chimiques en fonction de la position dans l'espace et en fonction du temps. Les deux phénomènes à l'origine de l'appellation y interviennent simultanément : d'une part, une réaction, au sens chimique, transforme petit à petit les réactifs ; d'autre part, un mouvement de diffusion induit le déplacement de ceux-ci dans l'espace. Chacun des deux phénomènes contribue différemment à l'évolution des concentrations en réactifs et leur couplage rend l'étude délicate.

CES MODÈLES sont étudiés depuis les années 1930 pour le cas le plus « simple », désormais baptisé KPP, d'après les initiales des mathématiciens soviétiques qui l'ont introduit, Andreï Kolmogorov, Ivan Petrovsky et Nikolaï Piskounov. Toutefois, le succès de ces systèmes est souvent porté au crédit de l'informaticien britannique Alan Turing qui, dans un magnifique article de 1952, justifie l'apparition de motifs, rayures ou taches dans le pelage des animaux à l'aide de tels systèmes d'équations couplées (1).

Aujourd'hui, ces modèles s'aventurent loin des laboratoires de chimie. Ils sont appliqués, avec quelques adaptations, à de multiples champs d'étude. Pour ne reprendre que l'exemple liminaire : en remplaçant la diffusion d'un réactif dans un becher par le mouvement de bandes de malandrins dans les beaux quartiers d'une ville, des chercheurs américains ont obtenu en 2008 une description satisfaisante des vagues de cambriolages dans les zones résidentielles en Californie (2).

> **“Les systèmes d'équations couplées ont de multiples champs d'applications”**

La multiplication et la diversité des applications ont eu quelques retombées : on a commencé par reconnaître des phénomènes « typiques » parmi les solutions. Localement, on peut trouver aussi bien un pic isolé dans le tracé de la courbe de concentration ou, au contraire, une zone réduite avec plusieurs motifs connectés. La rédaction de la dernière phrase cache une réalité plus mystérieuse : un même modèle peut donner l'un ou l'autre de ces comportements locaux selon les valeurs de ses paramètres, c'est-à-dire selon les valeurs des constantes qui décrivent le phénomène (par exemple, les coefficients de diffusion). Ainsi, en déplaçant un paramètre le long d'un curseur ou, de manière un peu moins facilement compréhensible, en faisant évoluer simultanément plusieurs paramètres, vous pouvez rassembler une famille de motifs en un seul pic désormais isolé ou, réciproquement, scinder un pic isolé en plusieurs motifs connectés.

CETTE TRANSITION très visuelle n'est pas si facile à expliquer sur les équations, puisque la forme de celles-ci ne change pas lorsque les paramètres sont perturbés. C'est l'enjeu de l'article des mathématiciens de l'université britannique de Bristol, actuellement en prépublication : « Disséquer le serpent : la transition entre les modèles localisés et les pics isolés dans les systèmes de formation de modèles » (*Dissecting the snake : the transition from localized patterns to isolated spikes in pattern formation systems,* en anglais) (3). Les deux auteurs livrent une explication purement mathématique de ces transitions à partir des graphes de bifurcation ; leur hypothèse est qu'une transition apparaît lorsque *« le premier pli du serpent homocline atteint la courbe du plan des paramètres où l'on passe de valeurs propres spatiales complexes à des valeurs propres spatiales réelles »*. En dépit de l'évocation poétique de ce *« serpent homocline »,* on doit reconnaître qu'une nouvelle fois, la clarté d'une explication mathématique diffère de la simplicité quasiment visuelle du phénomène décrit. ■

(1) A. Turing, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 237,* 37, 1952.
(2) M. B. Short *et al., Math. Models Methods Appl. Sci., 18,* 1249, 2008.
(3) N. Verschueren, A. Champneys, arXiv:1809.07847, 2019.

Roger Mansuy est professeur au lycée Saint-Louis, à Paris, et membre de la Commission française pour l'enseignement des mathématiques (CFEM).

DR

MYSTÉRIEUSE BIRMANIE

Mandalay, golfe du Bengale, temples de Bagan... il y a des noms qui font instantanément rêver. Sans même évoquer la vallée des rubis, célèbre titre de Joseph Kessel, aussi bien journaliste qu'aventurier qui raconta les richesses de Mogok, ville toute empreinte de légendes.

Le voyage proposé aujourd'hui au Myanmar par Sciences et Avenir invite à la découverte de ce pays mieux connu de beaucoup sous le nom de Birmanie, qui paraît toujours aussi mystérieux.

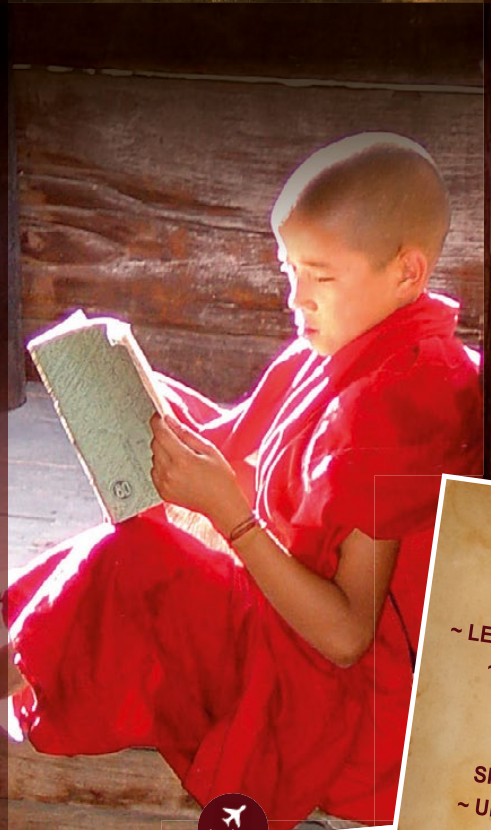
Parce qu'il est synonyme de pierres précieuses - aussi bien saphirs que rubis ! - de jade et autres pierres fines, il nous fallait, pour le décrypter, un spécialiste incontestable du domaine. Ce sera le cas, avec Didier Giard, membre de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer et Président de l'Association Française de Gemmologie, fin connaisseur de géopolitique, qui replacera pour nous l'importance du pays dans l'Asean (association des nations de l'Asie du sud-est) et sur les nouvelles routes de la Soie. Ce sont à la fois la découverte de sites somptueux et la compréhension du monde d'aujourd'hui qui vous sont proposées. Un merveilleux voyage en perspective.

Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction de Sciences et Avenir

AVEC VOUS À BORD !
DIDIER GIARD
Conférencier

Didier Giard est membre titulaire de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer où il occupe le siège de l'ancien ambassadeur André Lewin et est membre de la prestigieuse Société des Explorateurs Français crée en 1937 par Paul-Emile Victor.

©Wikipedia - www.pascale-m.com - Crédits photos : Wikimédia / Michael Gunther CC BY-SA 4.0 - Pixabay-CC0



LES EXPÉDITIONS SCIENCES ET AVENIR

CROISIÈRE EN BIRMANIE

FESTIVAL DU PHAUNG DAW OO AU LAC INLE

14 JOURS / 11 NUITS
DU 14 AU 27 OCT. 2020
A BORD DU PANDAW II

LES POINTS FORTS

~ UN CONFÉRENCIER DE TRÈS HAUT NIVEAU SPÉCIALISTE DE LA BIRMANIE.
~ LES VISITES DES PLUS BEAUX SITES DE LA BIRMANIE.
~ UNE DES MEILLEURES PÉRIODES DE L'ANNÉE.
~ LE GRAND MOMENT DE VOTRE CROISIÈRE, LE FESTIVAL DES BATEAUX PAGODES SUR LE LAC INLE, C'EST L'UN DES PLUS BEAUX SPECTACLES AQUATIQUES D'ASIE DU SUD-EST.
~ UN PETIT PAQUEBOT CONVIVIAL DE 20 CABINES POUR 40 PRIVILÉGIÉS.
~ UN TOUT COMPRIS BLEU VOYAGES (excursions, boissons à table, etc...).
~ UN ACCOMPAGNEMENT FRANCOPHONE.

À PARTIR DE
3 700 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON
TÉL. 04 72 76 75 66
www.expeditions-sciencesetavenir.fr

Bleu Voyages

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

Histoire des sciences

Terra incognita Alain Corbin

L'historien Alain Corbin raconte comment, du XVII^e^ au XIX^e^ siècle, la lente construction des sciences de la Terre a modifié les mentalités.

« *Connaître les hommes du temps jadis suppose de prendre en compte ce qu'ils ne savaient pas.* » L'ignorance est le fil rouge du dernier ouvrage d'Alain Corbin. Une nouvelle fois, cet historien atypique, qui s'est intéressé à la misère sexuelle et à la prostitution au XIX^e^ siècle, à l'odorat et aux paysages sonores aux XVIII^e^ et XIX^e^ siècles, prend un chemin de traverse.

Pour ce livre, l'historien a choisi de se concentrer sur la Terre, une grande inconnue pour les Européens au siècle des Lumières. En effet, si quelques-uns d'entre eux savaient en faire le tour à la voile, personne ne connaissait son âge, la composition de ses entrailles, les mouvements de ses plaques tectoniques, le fond de ses abysses océaniques ou encore les mécanismes de sa météorologie.

Grâce à une vaste documentation, qu'il restitue à ses lecteurs, Alain Corbin nous fait percevoir le lent recul des ignorances entre 1755, date du tremblement de terre de Lisbonne, et la fin de la Belle Époque. Il découpe son histoire en trois grandes parties – la seconde moitié du XVIII^e^ siècle, 1800-1850 et 1860-1900 –, autant d'étapes de la construction chaotique des savoirs. Pour chacune d'entre elles, l'auteur sélectionne des exemples marquants. Ainsi, l'éruption du volcan indonésien Tambora, en avril 1815, provoque d'importantes perturbations météorologiques au-dessus de l'Europe. Comment expliquer ces « brouillards secs » qui bloquent la lumière du soleil en plein midi ? Quelle est l'origine des pluies diluviennes qui inondent Genève, Amsterdam et de nombreux villages au bord du Rhin ? Les récoltes sont alors désastreuses, au point de conduire des régions entières à la famine.

L'auteur raconte comment la croyance en l'imminence de la fin du monde se répand. Il relate ainsi les mythes et les peurs issus de l'ignorance. Il analyse également le *« feuilletage des ignorances »*, c'est-à-dire les écarts de connaissance entre les différentes couches de la société. En 1755, les encyclopédistes des Lumières n'en savaient pas beaucoup plus sur les volcans et les tremblements de terre que l'homme du peuple. Puis, au fil des découvertes et de la diffusion inégale des connaissances, le feuilletage des ignorances s'est épaissi. *« Il s'accroît dans des proportions vertigineuses,* conclut l'auteur en faisant un saut jusqu'au XXI^e^ siècle. *La diversité des ignorances gêne l'échange entre les individus – ce qui peut paraître paradoxal à l'heure de la connexion et des réseaux sociaux. »* Un paradoxe encore plus frappant en pleine période de pandémie.

Mathias Germain

Alain Corbin, *Albin Michel, 284 p., 21,90 €.*

Médecine

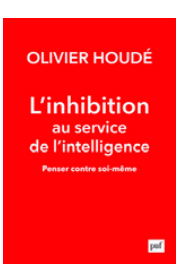
Le Charme secret de notre graisse

C'est injuste : certaines personnes à l'appétit gargantuesque gardent la ligne, tandis que d'autres mangent comme des moineaux et grossissent malgré tout. D'où viennent ces différences entre les individus ? Comment la graisse commande-t-elle l'appétit ou la satiété ? Et quel est le rôle du cerveau ? Après le best-seller de Giulia Enders, *Le Charme discret de l'intestin*, les éditions Actes Sud proposent une variation sur le thème de la graisse.

Les autrices, deux chercheuses néerlandaises, explorent les différentes facettes du fonctionnement normal et pathologique de nos cellules graisseuses. Elles exposent, dans un style concis, les dernières connaissances sur le sujet mais aussi toutes les zones d'ombre. Car on le sait aujourd'hui, l'obésité est une pathologie aux causes variées : mutations génétiques, dérégulation hormonale, stress, rythme de vie, infection virale, prise d'antidépresseurs ou de médicaments à base de corticostéroïdes… En plus d'un contenu scientifique solide, ce livre comprend de nombreux témoignages de patients et de leurs proches, ce qui donne une dimension humaine au récit. Un ouvrage qui comblera l'appétit scientifique des esprits les plus insatiables. À dévorer sans aucune modération, donc. **G. C.**

Mariëtte Boon et Liesbeth van Rossum, *Actes Sud, 304 p., 21 €.*

Psychologie



L'Inhibition au service de l'intelligence

La crise sanitaire liée à l'épidémie de Covid-19 est le terreau de l'irrationalité et des théories complotistes, amplifiées par l'usage massif des réseaux sociaux. Lorsque l'épidémie a débuté, Olivier Houdé, professeur de psychologie à l'université de Paris, avait déjà achevé l'introduction de son livre (une nouvelle édition de *Rationalité, développement et inhibition*, paru en 1995). Toutefois, l'analyse de l'auteur à propos du complotisme et de la radicalisation ou encore

de notre incapacité, en tant qu'espèce, à prendre collectivement les bonnes décisions sur l'environnement et le climat, fait écho à certains comportements actuels (ruée sur le papier toilette et sur les pâtes, par exemple). Il faut dire que la rationalité ne va pas de soi. Nos décisions sont principalement régies par des mécanismes de pensée rapides, automatiques. Pour activer une pensée logique, il nous faut donc inhiber nos automatismes – capacité sous-tendue par le cortex préfrontal. C'est ce que soutient la théorie de l'inhibition cognitive, imaginée par l'auteur dans les années 1990. Une lecture qui nous invite à interroger les limites de notre intelligence et à *« penser contre soi-même »*, précepte que chacun devrait méditer en temps de crise. **G. C.**

Olivier Houdé, *PUF, 148 p., 19 €.*

Neurosciences

Apprendre à dormir

Le psychiatre Patrick Lemoine réunit dans cet ouvrage des spécialistes du sommeil pour enfin apaiser nos nuits. Le sommeil, qui occupe près d'un tiers de nos vies, reste mal maîtrisé : nous dormons mal, trop ou trop peu et nous sommes donc souvent fatigués. De l'Antiquité à aujourd'hui, les hommes de science ont toujours exploré le sommeil des humains. Du fœtus hibernant dans le ventre maternel au vieillard sentinelle, ils nous expliquent ce qu'il se passe dans nos cerveaux et dans nos corps quand nous dormons. Alors, comment mesurer le sommeil ? Comment savoir s'il est déréglé par une pathologie, ou s'il est lui-même une maladie ? Pour ces fins connaisseurs du cerveau, le somnifère n'est pas une option. Ce médicament ne fait pas dormir, il anesthésie. La perte de conscience provoquée n'a rien de comparable avec le sommeil véritable qui, de léger à paradoxal, permet à l'organisme de se régénérer pour assurer une vie éveillée en pleine santé. De manière assez précise et pertinente, ce panorama d'expertises éclaire les questions qui se posent à tout être las de vivre épuisé. **V. M.**

Patrick Lemoine, *HumenSciences, 252 p., 19 €.*

Santé

L'Incroyable Vie de la peau

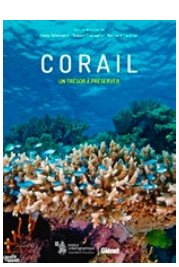
Le dermatologue Monty Lyman partage ses connaissances sur notre principale interface avec le monde.

Connaissez-vous le *Demodex* ? Mi-crabe, mi-araignée, cet acarien se love dans les sourcils le jour et s'en détache la nuit pour se propulser dans le sébum en quête de femelles. Il faut dire que le temps presse pour le *Demodex* qui, dépourvu d'anus, meurt au bout de deux semaines, car il est incapable d'expulser les cellules de peau morte dont il se repaît. Rassurez-vous, tout le monde ne transporte pas de *Demodex* dans ses sourcils. Reste que de nombreux autres organismes pullulent à la surface de notre peau et dans nos poils. Le dermatologue britannique Monty Lyman s'amuse à les inventorier dans un bestiaire surprenant destiné à initier le profane au foisonnement de vie sur notre peau. Cet organe – le plus étendu chez l'homme – remplit par ailleurs un grand nombre de fonctions, parfois vitales, comme la protection contre les UV et contre les infections, ou encore la régulation de la température interne.

Monty Liman fournit au lecteur des explications physiologiques et anatomiques détaillées, des descriptions de cas cliniques qui ont permis de faire avancer la dermatologie, mais il livre aussi nombre d'anecdotes à picorer. On apprend ainsi que trop manger la veille d'une exposition favorise les coups de soleil, que la moitié de la poussière de nos intérieurs provient des millions de cellules de peau que nous perdons chaque jour, qu'il est possible de déterminer dans 9 cas sur 10 si deux personnes forment un couple juste en analysant la diversité microbienne de leur peau. De la même façon, on peut distinguer les habitants de Toronto et de San Diego par une simple comparaison de leur flore cutanée. L'auteur aborde également la peau dans sa dimension psychologique, sociologique et philosophique, avec des réflexions sur sa fonction sociale (rougissement, réaction de stress, tatouages…) ou encore sur les rejets qu'elle peut engendrer (racisme, stigmatisation des malades de la syphilis ou du sida…). Un récit scientifique et humaniste foisonnant et passionnant. Gautier Cariou

Monty Lyman, *Tchou, 359 p., 19,95 €.*

Écologie



Corail, un trésor à préserver

Les récifs coralliens représentent moins de 0,2 % de la superficie océanique mondiale, mais abritent à eux seuls près d'un tiers des espèces marines connues. Charles Darwin lui-même, lors de son voyage à bord du *Beagle*, entre 1831 et 1836, en avait déjà remarqué l'extrême richesse. Mais ce trésor est aujourd'hui en péril : acidification de l'eau, augmentation de la température, pollution… sont autant de menaces qui pèsent sur ces écosystèmes uniques, comme l'expliquent Denis Allemand, du Centre scientifique de Monaco, et ses collègues dans cet ouvrage illustré très pédagogique. Heureusement, les auteurs complètent ce tableau, assez sombre, de la situation actuelle par une présentation de nombreuses actions visant à préserver ces récifs, de l'Indonésie à… Monaco. Car la principauté multiplie les initiatives pour protéger cette richesse en danger. **B. R.**

Denis Allemand, Robert Calcagno et Bernard Fautrier (dir.), *Glénat, 144 p., 19,95 €.*

Technologie

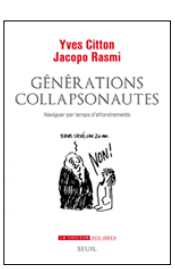
L'Emprise insidieuse des machines parlantes

L'émergence des assistants conversationnels ouvre une période sombre pour l'homme, prédit le psychiatre et spécialiste du numérique Serge Tisseron.

Siri, Google Home, Alexa, Echo… ces « agents ou assistants conversationnels » qui déferlent dans nos environnements et « les robots sociaux » qui suivent seront-ils les outils numériques de notre futur ? Serge Tisseron, psychiatre, psychanalyste et membre de l'Académie des technologies, n'en doute pas. Mais il met en garde dans cet ouvrage ceux qui manqueraient de clairvoyance sur les capacités réelles de ces outils, et de leurs concepteurs, à manipuler nos émotions et nos comportements. *« Ces machines présentées avec enthousiasme ont en réalité des performances très en deçà des discours marketing destinés à les faire acheter »,* rappelle-t-il en préambule, mais le fait qu'elles parlent et soient conçues pour dialoguer avec nous inaugure *« un changement radical du statut des machines ».* Pour le psychanalyste, cette capacité nouvelle entraîne quatre ruptures civilisationnelles. Ainsi, si une voix artificielle se rapproche de celle de l'être humain, alors nous sommes enclins à prêter à la machine des émotions. Si l'interaction comporte des codes typiquement humains comme la prévenance ou la politesse, alors nous avons une propension naturelle à lui attribuer un statut de personne. Si l'intimité avec la machine se renforce, par le jeu de dialogues toujours bienveillants et protecteurs, alors nous aurons tendance à nous confier (et nos données avec). Enfin, si ces machines répondent aux fantasmes et aux attentes de l'homme, il sera difficile de leur résister… L'auteur présage que, très bientôt, *« une économie de la confidence se substituera à l'actuelle économie de l'attention en vigueur sur les réseaux sociaux ».* Ce qu'il nomme *« capitalisme affectif ».* Parmi les exemples qui font froid dans le dos, il raconte que Google a déposé un brevet destiné à créer la personnalité de l'assistant conversationnel à partir d'informations fournies par l'usager, tirées des conversations avec la machine ou sur les réseaux sociaux, et de tout ce qui peut être récupéré par les différentes applications de Google, comme l'agenda, la géolocalisation, etc. Un ouvrage passionnant et un réquisitoire sévère qui ouvre les esprits. Hervé Cabibbo

Serge Tisseron, *Les Liens qui libèrent, 208 p., 17 €.*

Écologie



Générations collapsonautes

La collapsologie, néologisme qui désigne l'étude de l'effondrement prochain de nos modes de vie et de consommation, fait florès. Cette prédiction n'est pourtant pas nouvelle, ainsi que le rappellent les auteurs, Yves Citton et Jacopo Rasmi, mais son émergence auprès du grand public vient en écho aux alertes scientifiques de plus en plus documentées sur les dérèglements climatiques et l'effondrement de la biodiversité. Le succès de la collapsologie serait ainsi le reflet d'une prise de conscience écologique ; il témoignerait aussi d'une volonté d'apprendre à vivre avec le délitement en cours.
Yves Citton et Jacopo Rasmi s'emparent de ce mouvement comme d'un prisme dont ils étudient toutes les facettes : les thèses de la collapsologie – dont ils s'évertuent à montrer les perspectives plurielles, au-delà de la hantise dominante – mais aussi les critiques dont elle fait l'objet, au premier rang desquelles on retrouve la dénonciation des possibles dérives religieuses. À partir de là, ils défrichent des *« voies d'avenir navigables et désirables »* qui pourraient permettre de rendre l'après-effondrement *« moins autodestructeur, moins irréfléchi, moins inégalitaire, moins inique que l'avant ».* Une exploration intellectuelle emballante. **V. G.**

Yves Citton et Jacopo Rasmi, *Seuil, 288 p., 23 €.*

Sociologie

Les Maladies du bonheur

Le titre de cet essai résume parfaitement « l'impasse anthropologique » mise en lumière par l'auteur, sociologue : la recherche du bonheur que mènent les humains modernes est une course sans fin ; pire, elle se fait au détriment des solidarités, s'accompagne de solitude et de souffrances, et se traduit par des maladies de plus en plus individualisées (cancer, diabète…) et par l'essor de comportements addictifs. L'enquête est ainsi volontairement asymétrique : elle privilégie

une analyse de la modernité sous l'angle des mal-être. Les données sur lesquelles elle s'appuie sont notamment empruntées à la sociologie, à la psychiatrie et, singulièrement, à la génétique. L'auteur s'attache en effet à démontrer que nos aptitudes cognitives inégales face aux « maladies du bonheur » sont, pour une part importante, le fruit de notre héritage génétique et épigénétique. Mais le livre va au-delà de ce constat. Il invite à remettre au centre de la réflexion *« le rapport entre l'homme, les autres espèces et l'environnement »* et à rétablir les équilibres entre ces différents pôles. Un questionnement sur la vie actuelle qui mérite qu'on s'y attarde, à défaut d'être toujours convaincant. **V. G.**

Hugues Lagrange, *PUF, 480 p., 22 €.*

Démographie

Faut-il avoir peur de la population mondiale ?

L'évolution d'une population de 1 milliard d'habitants sur Terre en 1800 à 8 milliards aujourd'hui est une source de questionnement, voire d'inquiétude. Pour certains, cette croissance démographique serait même une des principales causes de la destruction de notre planète. D'autres considèrent que la science pourra résoudre tous les problèmes, y compris un éventuel surplus de population. Jacques Véron, directeur de recherche à l'Institut national d'études démographiques, tente dans son nouvel ouvrage de réconcilier optimistes et pessimistes. Après *Démographie et Écologie* (Découverte, 2013), le chercheur tente d'aborder le problème par un autre angle, celui de l'optimum de population. Cette idée est ancienne, et la difficulté a toujours été de trouver un équilibre entre la population et les ressources nécessaires à sa survie. Dans ce livre, l'auteur reprend les idées liées à ce concept, comme le droit au développement pour réduire les inégalités ou les excès de l'urbanisation. Un livre spécialisé, donc, mais qui porte un nouveau regard sur le futur de la population mondiale. **V. F.**

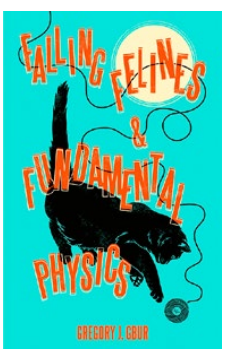
Jacques Véron, *Seuil, 253 p., 8,30 €.*

Lu d'ailleurs ***Histoire des sciences***

Falling Felines and Fundamental Physics

Gregory J. Gbur

Le physicien américain Greg Gbur s'intéresse à la façon dont les chats retombent sur leurs pattes. Et il a beaucoup à dire.



Les plus fidèles lecteurs de *La Recherche* se souviennent peut-être d'avoir lu en mai 2014 un article de Greg Gbur, de l'université de Caroline du Nord, intitulé « Le mystère des chats qui retombent toujours sur leurs pattes ». L'auteur a depuis développé son propos, au point d'en faire un livre. Il nous y révèle les richesses insoupçonnées de ce sujet d'apparence anodine. Simplifions et tenons un chat pattes en l'air, avant de le lâcher brusquement sans lui donner aucun mouvement de rotation (Greg Gbur, amoureux des chats, déconseille de le faire). Le principe de conservation du moment cinétique devrait lui interdire de se retourner. L'animal a pourtant la réputation, méritée, d'y parvenir fréquemment.

Au milieu du XIX^e^ siècle, le paradoxe a intrigué les physiciens britanniques George Stokes et James Clerk Maxwell, passés à la postérité pour des travaux bien différents. Son intérêt pour la question valut même au second une réputation imméritée de *« lanceur de chats »* au Trinity College de Cambridge. Amateur d'archives, Greg Gbur nous fait revivre les séances que l'Académie des sciences française consacra au sujet en 1894 et 1895, sous l'impulsion d'Étienne-Jules Marey, qui avait capturé une preuve de la réalité du phénomène grâce à sa nouvelle méthode de photographie rapide. Il décrit aussi en détail les solutions proposées : en reconnaissant qu'un chat est un corps déformable, les physiciens purent expliquer sa rotation par une combinaison de mouvements et de torsions internes. Les discussions sur la nature exacte de ces mouvements se sont toutefois poursuivies jusqu'à la fin des années 1960.

Entre-temps, des physiologistes s'étaient attaqués à une autre énigme. Pendant qu'il tombe, un chat ne ressent pas la gravité : à quel moment, et par quel mécanisme détermine-t-il dans quel sens il lui vaut mieux atterrir ? Là encore, Greg Gbur allie rigueur scientifique, anecdotes et documents d'archives pour décrire l'ingéniosité des dispositifs expérimentaux mis au point pour y répondre, et la témérité de certains chercheurs. L'Américain Herbert Stallings, qui pilota en 1957 plusieurs jets de combat pendant que des chats évoluaient en chute libre dans son cockpit, a toute mon admiration ! Le tour d'horizon n'aurait pas été complet sans les applications pratiques de ces travaux. Ainsi, Greg Gbur nous décrit les mouvements, en partie copiés sur ceux des chats, qu'utilisent les passagers de la Station spatiale internationale, en chute libre permanente, pour se déplacer en douceur. Et il nous présente des roboticiens qui rêvent de machines équipées de pattes et capables, elles aussi, de se retourner lorsqu'elles tombent afin de poursuivre leur progression. Vous ne regarderez plus les chats de la même façon après avoir lu ce livre.

Luc Allemand, conseiller en information scientifique

Gregory J. Gbur, *Yale University Press, 338 p., 26 $.*

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

EN VERSION PAPIER ET NUMÉRIQUE NOUVEAU

à partir de **60€**

+ EN CADEAU 2 nos Hors-série au choix

Partez à la découverte des mystères du sommeil et des rêves, dans ce hors-série de La Recherche.

100 jeux mathématiques, 25 énigmes policières, des entretiens avec Cédric Villani, Mickaël Launay, des articles...

Pesticides, particules fines, perturbateurs endocriniens… Ces molécules qui nous empoisonnent. Les solutions des scientifiques.

Le génie de l'animal : intelligence, empathie, habileté.

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à La Recherche et je reçois **EN CADEAU** 2 hors-série au choix.

☐ OFFRE CLASSIQUE 1 AN - 10 n° + 1 n° double (en version papier et numérique)* pour **60€** au lieu de ~~71,90€~~**

☐ OFFRE COUPLÉE 1 AN - 10 n° + 1 n° double + 4 hors-série (en version papier et numérique)* pour **84€** au lieu de ~~99,50€~~**

PLRC559

Je choisis mes 2 cadeaux :

☐ Le sommeil et le rêve (G22) ☐ 100 jeux mathématiques (G23) ☐ Ces molécules qui nous empoisonnent (G24) ☐ Le génie de l'animal (G25)

***Rendez-vous sur www.larecherche.fr et créez votre compte en ligne pour accéder à la version numérique des numéros compris dans votre abonnement.**

MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme ☐ Melle

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Tél. :

Ville :

Pour accéder à la version numérique de vos numéros, merci d'indiquer votre e-mail :

E-mail : @

MON MODE DE RÉGLEMENT

☐ chèque bancaire à l'ordre de La Recherche ☐ carte bancaire

N°

Expire fin

Signature obligatoire

Service abonnements : France : 01 55 56 71 15 - & Étranger ; 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

☐ J'accepte de recevoir par mail des offres des partenaires de La Recherche.

La Recherche

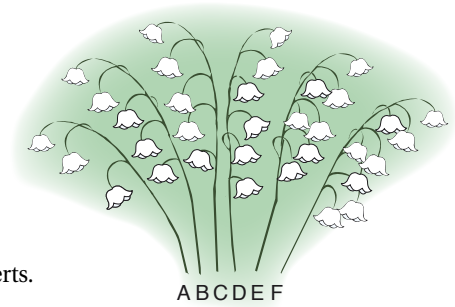
** Vous pouvez acquérir séparément chacun des numéros normaux au prix de 6€40, le numéro double au prix de 7€90 et les hors-série au prix de 6€90. Offre exclusivement réservée aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine dans la limite des stocks disponibles. Vous recevrez vos cadeaux sous 8 semaines maximum. La société Sophia Publications située au 8 rue d'Aboukir, Paris 2e est responsable de traitement et collecte des données afin de servir votre abonnement. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 6 ans à partir de votre désabonnement. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiapublications.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. La société Sophia Publications dispose d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 8 rue d'Aboukir, Paris 2e ou à l'adresse mail dpo@sophiapublications.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

En mai, joue comme il te plaît

L'équipe du magazine *Tangente* vous propose cette page de défis ludiques sur le thème de la nature. Même si nous sommes confinés, mai reste le mois de la forêt et des arbres.

Le muguet de Mélanie

Le 1er mai, les quatre fils de Mélanie lui ont offert du muguet (six brins en tout). Albain en premier, puis Brice, suivi de Charles et enfin de Denis. Il se trouve que le muguet de chacun avait une clochette de plus que le précédent.
Ravie, la maman a mis tous les brins dans le même vase.
➔ Attribuez à chacun le ou les brins qu'ils ont offerts.

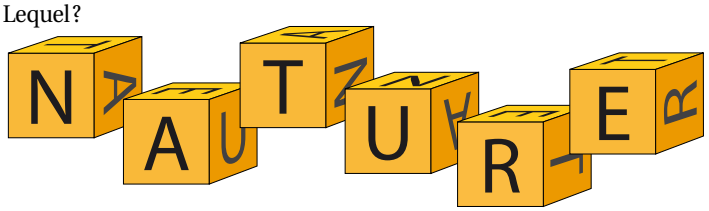


Casse-noisettes

Alpha, Bêta et Gamma, des écureuils affamés, ont récolté à eux trois 231 noisettes. C'est Alpha qui en a ramené le plus et Gamma le moins. Leurs récoltes respectives forment une suite géométrique : on passe de l'une à la suivante en multipliant par le même nombre. Alpha est le plus gourmand, mais aussi le plus généreux. Quand il voit que son camarade Delta, blessé, n'a pas pu ramasser de noisettes, il lui donne le tiers de sa récolte.
➔ Combien de noisettes chacun des écureuils avait-il amassées ?

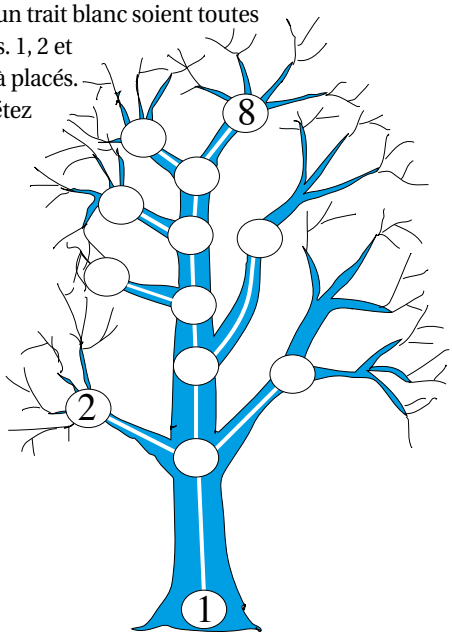
Cubes nature

Sur les six faces de chacun des six cubes se trouvent les lettres N, A, T, U, R, E. Cinq de ces cubes sont identiques, mais l'un d'eux diffère des autres.
➔ Lequel ?



Un arbre porte-bonheur

Les cercles dessinés sur cet arbre doivent contenir les nombres 1 à 13, de telle sorte que les différences entre les nombres écrits dans deux cercles directement reliés par un trait blanc soient toutes différentes. 1, 2 et 8 sont déjà placés.
➔ Complétez le dessin.



Le jardin du Clerc Semé

Dans le jardin du Clerc Semé, on dénombre sept alignements de trois arbres.
Or on ne compte que huit arbres au total.
➔ a) Dessinez un arrangement de huit arbres qui satisfasse cette propriété.
b) Combien pourrait-on, au maximum, obtenir d'alignements similaires avec neuf arbres ?

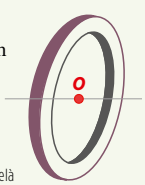
SOLUTIONS DES JEUX DU NUMÉRO 558

Mettre de l'eau dans son vin

Le niveau de liquide n'a changé dans aucun des verres. Donc s'il manque 1 cm³ de vin dans le verre à vin, c'est qu'il a été remplacé par 1 cm³ d'eau. Il manque ainsi 1 cm³ d'eau dans l'eau.
Par conséquent, il y a autant de vin dans l'eau que d'eau dans le vin, que l'on touille ou non.

L'attraction décroissante

Si le corps massif possède la forme d'un anneau, la force subie par une bille est nulle en son centre et augmente si la bille commence à s'en éloigner le long de l'axe de l'anneau **(1)**.



(1) Elle n'augmente pas indéfiniment : elle décroît au-delà d'une distance égale à la racine carrée de la moitié du rayon de l'anneau.

Fondra ou fondra pas ?

À mesure que la température du trombone grimpe, il rayonne de plus en plus. Pour une certaine température T inférieure à 1 350 °C, l'énergie rayonnée compense celle absorbée et il demeure à T.

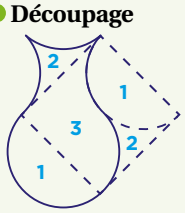
Le miroir magique

Si l'on se tient debout sur un miroir, on dira qu'il inverse le haut et le bas.

Question d'équilibre

Le poids sera le même, mais le bras de levier sera plus court du côté de la moitié pliée, si bien que la planche basculera du côté non plié.

Découpage



Énigmes créées par Élisabeth Busser, Gilles Cohen, Michel Criton, Jean-Louis Legrand et Bernard Myers.
www.tangente-mag.com

Solutions dans le prochain numéro

La surveillance de la pandémie demande une éthique de responsabilité

Pour beaucoup, l'éthique des applications des sciences repose sur le respect de grands principes régulateurs, comme les quatre préceptes cardinaux du rapport Belmont pour la bioéthique : non-malfaisance, bienfaisance, respect de l'autonomie de la personne et justice. Toutefois, elle ne s'y réduit pas. Sans doute le rappel de ces principes suscite-t-il des interrogations salutaires, mais l'éthique va au-delà de la simple application de règles ; elle relève avant tout de la réflexion inquiète et soucieuse.

L'actualité nous en offre une excellente illustration. Pour hâter la fin du confinement, les épidémiologistes proposent de recourir à des tests en grand nombre – tests PCR (pour *polymerase chain reaction*), afin de savoir qui est atteint, et tests sérologiques, pour savoir qui est immunisé – puis, une fois cette connaissance acquise, de mettre en place une surveillance active pour éviter un funeste rebond de la contagion. Tirant parti du déploiement massif des technologies, cette surveillance recourt au numérique, avec une localisation possible par le GPS et, surtout, une identification des personnes fréquentées au moyen du Bluetooth des téléphones. En cas de symptômes manifestes, on retrouvera alors les contacts susceptibles d'avoir été contaminés afin de les maintenir en quarantaine et, ce faisant, de les soigner et d'éviter qu'ils ne propagent à leur tour la maladie.

AU NOM DE PRINCIPES fort légitimes de protection de la vie privée, certains désapprouvent cette stratégie. Les plus extrêmes dénoncent même la manifestation d'un totalitarisme d'État. Si ces craintes se justifient en temps ordinaire, elles doivent, dans la période actuelle, être mises en regard des autres enjeux. Le refus de toute concession, et donc de toute surveillance, conduirait soit à une prolongation du confinement, dont les conséquences humaines et économiques seraient désastreuses, soit, au cas où l'on mettrait prématurément fin au confinement, au risque d'une nouvelle flambée de l'épidémie qui causerait des dizaines, voire des centaines de milliers de morts.

> **“Ces craintes d'une atteinte à la vie privée doivent être mises en regard des autres enjeux”**

Sacrifier toute considération au respect d'un seul principe relève de ce que le sociologue allemand Max Weber appelait l'éthique de conviction ; il l'opposait à l'éthique de responsabilité. L'antagonisme de ces deux éthiques ne signifie pas que les partisans de l'éthique de conviction ne se sentent jamais responsables, ni que les tenants de l'éthique de responsabilité renoncent à toute conviction. Les premiers se sentent indubitablement responsables du triomphe de leurs convictions, qu'ils placent au-dessus de tout. Pour eux, les échecs tiennent non pas à l'insuffisance de leurs convictions, mais aux autres ; ils ne s'en jugent pas responsables. Les seconds examinent les conséquences de toutes les options, sans négliger le reste au profit de l'application d'un seul principe.

Rapportée à la situation actuelle, l'éthique de conviction ne porte attention qu'à quelques points, par exemple la protection de l'intimité individuelle, sans considérer la privation de la plus élémentaire des libertés, celle d'aller et venir, qui est la pire des atteintes à la vie privée, ni les morts causées par la propagation du virus, ni enfin les conséquences sanitaires de la crise économique qui découlerait d'un trop long confinement.

EN REVANCHE, l'éthique de responsabilité examine et pèse tous ces aspects. Elle n'en omet aucun, pas même les conséquences actuelles, et surtout futures, de cette surveillance sur la protection des libertés individuelles. Ainsi doit-elle aussi se soucier de la réversibilité des mesures d'exception prises aujourd'hui, en s'assurant que la surveillance demeurera limitée dans le temps, que le recueil d'informations restera ciblé et proportionnel à des besoins clairement exprimés, que les données personnelles acquises seront effacées une fois la crise passée, que les États ne renonceront pas à assumer les attributs de leur souveraineté au profit d'acteurs industriels et, enfin, que les mesures privatives de liberté seront révocables, en sorte que l'on pourra réactiver, au terme de la pandémie, des lois conformes aux aspirations de la société. Comment, dès lors, ne pas préférer l'éthique de responsabilité à une éthique de conviction dogmatique, surtout dans des situations de crise ? ■

Jean-Gabriel Ganascia est professeur d'informatique à Sorbonne Université. Il préside le comité d'éthique du CNRS (Comets). Les vues exprimées dans cette chronique n'engagent que leur auteur.

PIERRE KITMACHER

franceculture.fr/
@Franceculture

Nous sommes composés de 65% d'eau et de 35 % de questions.

LA MÉTHODE SCIENTIFIQUE
DU
LUNDI
AU
VENDREDI
16H00

NICOLAS MARTIN

france culture

L'esprit d'ouver-ture.

En partenariat avec La Recherche

© Radio France/Ch. Abramowitz

TOUS UNIS CONTRE LE VIRUS !

Pour aider les soignants, les chercheurs
et les personnes vulnérables,
faites un don sur fondationdefrance.org

ASSISTANCE PUBLIQUE HÔPITAUX DE PARIS

Fondation de France

INSTITUT PASTEUR

et de nombreux acteurs engagés sur le terrain.