



Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Cosmologie

**LA PLUS
GRANDE CARTE
DE L'UNIVERS**

■ Neurosciences

**ÉCRIRE
PAR LA PENSÉE,
C'EST POSSIBLE**

■ Mathématiques

**DE L'INDÉCIDABILITÉ
DANS UNE ÉNIGME
RÉCRÉATIVE**

09/21

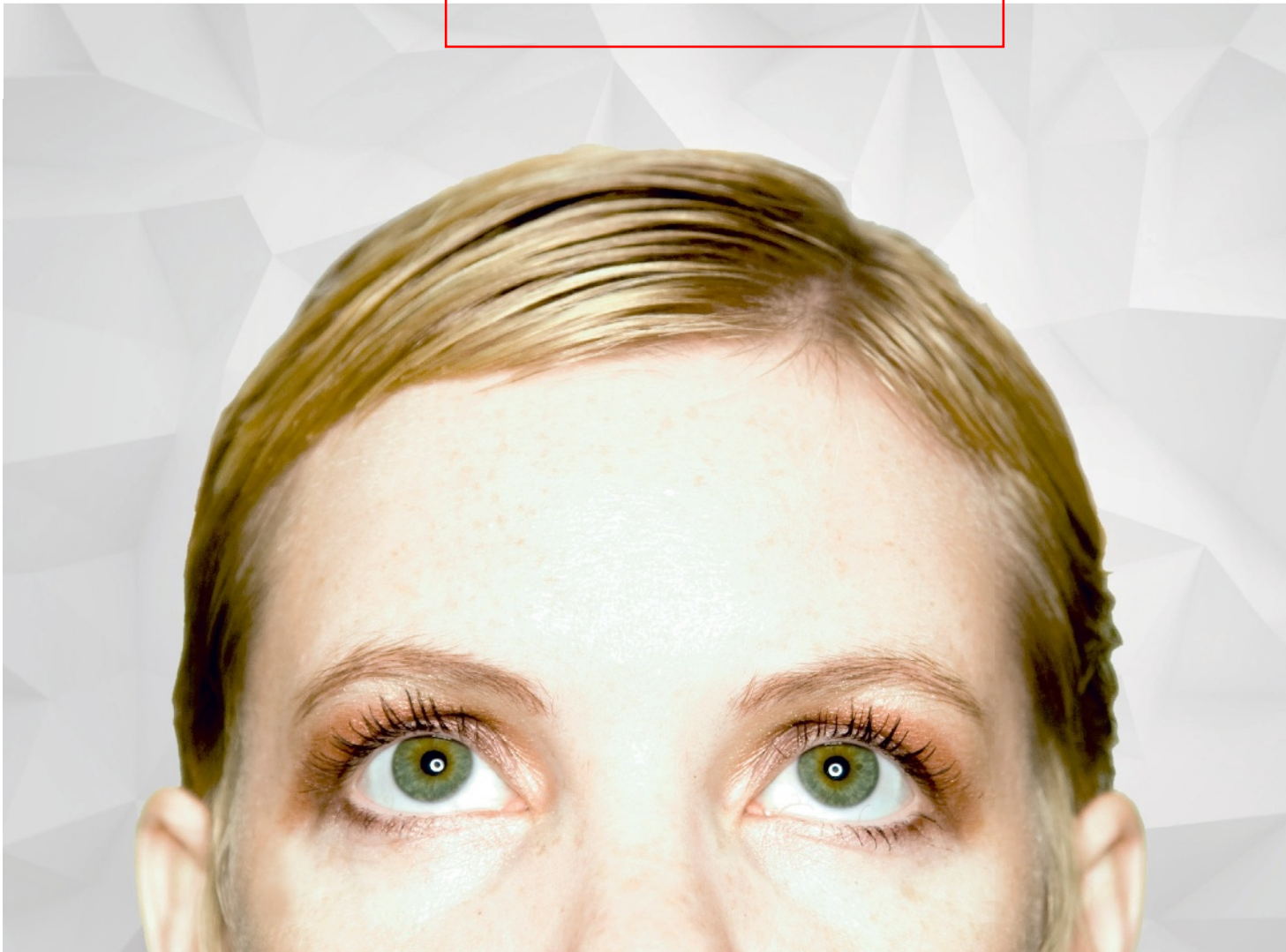
Microbiote, stress, Covid-19...

**CE QUE
NOS ODEURS
DISENT
DE NOUS**



L 13256 - 527 - F: 6,90 € - RD





AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women In Science«

Partenaires

Robert Bosch Stiftung

Spektrum
der Wissenschaft

nature

Pour la Science



Maurice Mashaal
Rédacteur en chef

CES BACTÉRIES QUI NOUS PARFUMENT

Le monde des odeurs joue dans nos vies un rôle que l'on sous-estime. Ceux qui ont momentanément perdu l'odorat après avoir contracté le Covid-19 peuvent en témoigner! Il ne s'agit pas uniquement de sentir une fleur, un bon plat, le sol chaud après la pluie, un parquet qui vient d'être ciré... Les odeurs de nos propres corps ont aussi beaucoup d'importance, même si nous en sommes généralement très peu conscients et si l'influence de nos effluves sur nos relations avec les autres reste mal cernée par la science.

D'où viennent nos odeurs corporelles? La réponse peut surprendre. En effet, détaillent Geneviève Héry-Arnaud et Georges Travert (voir pages 24 à 33), une bonne partie du bouquet que nous dégageons est due aux bactéries que nous hébergeons. Ce microbiote varie d'un endroit à l'autre de l'organisme, ainsi que d'un individu à l'autre. Et, contrairement à ce que l'on pense, nos bactéries peuvent sentir bon...

Au-delà du caractère plaisant ou déplaisant des odeurs corporelles, qui dépend beaucoup des personnes et de leur perception olfactive, les scientifiques se sont rendu compte que les effluves d'un individu véhiculent des informations sur sa santé. C'est ainsi que plusieurs équipes ont dressé des chiens renifleurs capables de détecter des cancers du sein, des infections pulmonaires, des cas de Covid-19...

L'utilisation de tels chiens est-elle une perspective médicale réaliste? Peut-être dans certaines situations. Mais il est plus vraisemblable que, pour des diagnostics à grande échelle, l'avenir soit du côté des «nez électroniques». Les performances de ces capteurs moléculaires sont encore loin de celles des nez biologiques, mais ces systèmes se développent peu à peu. Et une meilleure compréhension de la neurobiologie de l'olfaction, qui est sans doute le sens le plus complexe et le moins bien connu (voir pages 34 à 41), ne pourra qu'accélérer la mise au point de nez artificiels satisfaisants. ■

SOMMAIRE

N° 527 / Septembre 2021

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Mission InSight: la planète Mars à cœur ouvert
- Des ptérosaures juvéniles à l'aise dans les airs
- De l'eau liquide qui grimpe à notre gré
- L'art fractal du chou romanesco
- Repliement des protéines: la percée de l'IA
- Dinosaures: le déclin avant l'astéroïde?
- Des atomes qui se mettent en bandes
- Les exceptionnels bronzes de Gannat

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

Une diplomatie en suspens pour l'environnement
Catherine Aubertin

P. 22

LES SCIENCES À LA LOUPE

Une nouvelle particule pour chaque anomalie!
Yves Gingras

GRANDS FORMATS



P. 46

COSMOLOGIE

LA PLUS GRANDE CARTE DE L'UNIVERS

Kyle Dawson et Will Percival

Retracer 11 milliards d'années d'histoire cosmique! Tel est le défi relevé par les astronomes qui ont mesuré la distance et la vitesse de millions de galaxies. En prime, avec ces données, ils lèvent une partie du voile sur l'une des grandes énigmes de l'Univers: l'énergie sombre.



P. 58

ÉCOLOGIE

QUAND LE TIGRE ET LE LION COHABITAIENT EN ASIE

Annik Schmitzler et Luc Hermann

Il n'y a pas si longtemps, les lions et les tigres étaient largement répandus en Asie et vivaient en partie dans les mêmes régions. Comment ont-ils coexisté, et pourquoi sont-ils aujourd'hui proches de l'extinction?



P. 54

PALÉOANTHROPOLOGIE

«NON, ON NE VIENT PAS DE DÉCOUVRIR DEUX NOUVELLES ESPÈCES HUMAINES!»

Entretien avec Jean-Jacques Hublin

Deux équipes ont publié chacune la découverte d'une nouvelle espèce humaine datant d'environ 140 000 ans: l'homme de Nesher Ramla en Israël et l'homme dragon en Chine. Des paléanthropologues le contestent.

P. 66

NEUROSCIENCES

ÉCRIRE PAR LA PENSÉE

Jérémie Mattout

Fermez les yeux. Mentalement, imaginez tracer une lettre avec un stylo. Miracle, elle apparaît sur l'écran. Science-fiction? Non, la conversion de l'activité cérébrale en lettres affichées vient d'être réalisée à l'aide d'interfaces cerveau-machine. Et testée avec succès sur un patient tétraplégique.



Pour la Science.fr

LETTRE D'INFORMATION

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

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

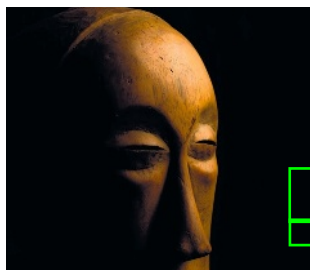
Inscrivez-vous www.pourlascience.fr



En couverture :
© watchara/shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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



P. 72

HISTOIRE DES SCIENCES

GARE AU GORILLE!

Cédric Crémière

Entre fantasmes, politique et débats sur la classification des grands singes, l'histoire de la découverte du gorille, au XIX^e siècle, montre à quel point les dimensions naturelle et culturelle sont imbriquées dans l'élaboration de la science.

P. 24

MICROBIOLOGIE



CE QUE NOS ODEURS DISENT DE NOUS

Geneviève Héry-Arnaud et Georges Travert

Pourquoi dégageons-nous des odeurs? En explorant les dessous de nos fragrances, biologistes, chimistes et médecins ont eu du nez: nos effluves ressemblent à une sorte de code que l'on commence à exploiter dans les diagnostics de santé.

P. 34

DU NEZ BIOLOGIQUE AU NEZ ÉLECTRONIQUE

Federica Sgorbissa

Au fil de l'évolution, les systèmes olfactifs des animaux ont résolu nombre de problèmes liés à l'analyse des molécules odorantes. Comment s'en inspirer pour développer des systèmes olfactifs artificiels plus performants?

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

MESURER LE TEMPS EN ALLUMANT DES MÈCHES

Jean-Paul Delahaye

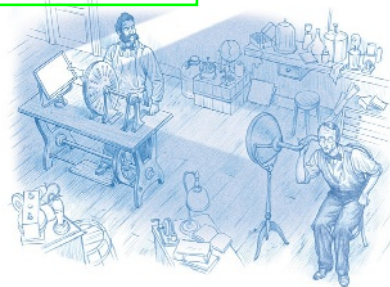
Un problème de récréation mathématique fait surgir des énoncés indécidables plus simples que ceux que l'on connaissait.

P. 86

ART & SCIENCE

Les aiguilles de l'éveil

Loïc Mangin



P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE
Écouter la lumière

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Quatre beaux pigeons pour le prix d'un

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE
Le goût de l'oie rôtie

Hervé This

P. 98

À PICORER

COMMUNIQUÉ
PAGES I À IV (APRÈS LA P. 41)

La flexibilité du réseau au service de la transition écologique

En partenariat avec

ENEDIS
L'ÉLECTRICITÉ EN RÉSEAU

A

CTUALITÉS

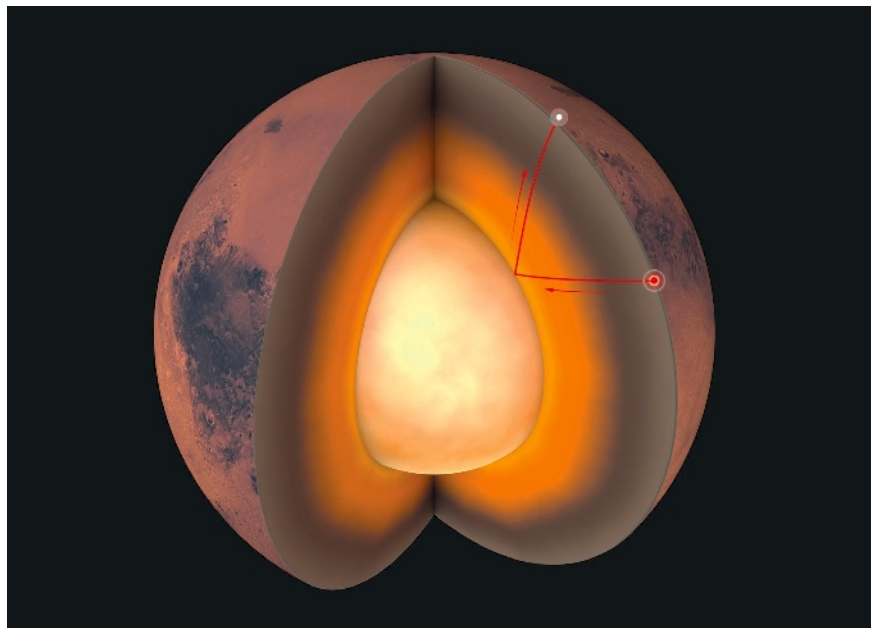
P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Disputes environnementales

P.22 Les sciences à la loupe

MISSION INSIGHT: LA PLANÈTE MARS À CŒUR OUVERT



Coupe de la structure interne de la planète Mars. La propagation d'ondes sismiques se réfléchissant à la surface du noyau a permis d'estimer le rayon de ce dernier.

Grâce au sismomètre d'InSight, la structure interne de la Planète rouge se précise, avec un noyau qui se révèle plus grand et moins dense que prévu.

Au début du xx^e siècle, des géophysiciens ont dévoilé la structure interne et inaccessible de la Terre grâce à l'étude des ondes sismiques. Déclenchées par un tremblement de terre, ces ondes se propagent à travers la planète, changent de vitesse ou de direction quand elles arrivent à l'interface de deux milieux différents. C'est ainsi que les spécialistes ont précisé les propriétés du noyau, du manteau et de la croûte terrestres, et ont posé les fondations de nos connaissances géologiques. La structure interne des autres planètes du Système solaire est encore très mal connue. C'est tout l'enjeu de la mission *InSight* et de son sismomètre Seis qui ont, pour la première fois et avec succès, cartographié l'intérieur de la planète Mars. Au sein d'une collaboration

internationale, Philippe Lognonné, de l'université de Paris, de l'institut de physique du globe de Paris et responsable scientifique de Seis, et ses collègues viennent de publier trois articles livrant une description inégalée de la Planète

Le noyau martien a un rayon d'environ 1830 kilomètres

rouge. Une moisson de découvertes particulièrement riche qui détaille pour la première fois les propriétés du noyau, du manteau et de la croûte martiennes.

La mission *InSight* est arrivée sur Mars en novembre 2018 et l'instrument Seis a commencé ses prises de données en février 2019. Après plusieurs mois de fonctionnement, les géophysiciens ont présenté un certain nombre de résultats en 2020. La planète est bien soumise à des séismes, mais semble plus calme que prévu. En l'absence de tectonique des plaques (à la différence de la Terre), la plupart des vibrations détectées semblent dues à une activité de faible profondeur localisée dans la région de Cerberus Fossae. La magnitude de tous ces événements reste modeste, inférieure à 3,7.

La difficulté avec des séismes de faible magnitude est qu'il est plus ardu d'en extraire de l'information. En outre, la surface de Mars est soumise à des vents importants qui génèrent du bruit dans les enregistrements du sismomètre. Pour limiter ces effets parasites, un bouclier éolien et thermique recouvre l'instrument pour l'isoler au maximum des perturbations météorologiques. Le sismomètre a ainsi détecté plus de 600 séismes.

Le premier des nouveaux résultats porte sur la mesure du rayon du noyau martien et la caractérisation de son état. Pour cela, il était nécessaire d'enregistrer un signal sismique d'ondes qui rebondissent sur l'interface manteau-noyau. La collaboration InSight a ainsi déterminé que le rayon du noyau fait environ 1830 kilomètres (un peu plus de la moitié du rayon total de Mars) et que le noyau est liquide. Le rayon obtenu fait partie de la fourchette haute des estimations généralement admises jusqu'ici. Comme la masse du noyau était connue par ailleurs en étudiant les mouvements de la planète, un noyau plus grand implique que sa densité soit moins élevée qu'on ne le pensait. Son alliage fer-nickel est donc très enrichi en éléments plus légers tel que l'hydrogène, l'oxygène ou le carbone.

Avec un noyau aussi gros, le manteau est moins épais et sa base n'atteint pas des pressions suffisantes pour former un type particulier de minéraux, une pérovskite nommée «bridgmanite» (qui représente les roches les plus abondantes dans

le manteau inférieur de la Terre). «Des modèles d'évolution thermique de la planète Mars prévoyaient leur existence et ont montré que leur forte viscosité et leur caractère isolant auraient limité les mouvements de convection, source des échanges de chaleur dans l'intérieur de la planète» souligne Adrien Broquet, de l'université de l'Arizona, qui a participé à l'étude. Ainsi, en l'absence de bridgmanite dans le manteau martien, la convection aurait été extrêmement vigoureuse mais brève, ce qui expliquerait pourquoi Mars a perdu son champ magnétique global si rapidement. Or le déclin du champ magnétique martien a de fortes implications sur le maintien d'eau liquide à sa surface et sur son habitabilité.»

La convection intense et brève ainsi que la perte de chaleur associée ont peut-être contribué à un effet dynamo dans le noyau plus important et un champ magnétique plus intense que prévu. En l'occurrence, *InSight* est aussi équipée d'un magnétomètre qui a enregistré le champ magnétique rémanent à la surface

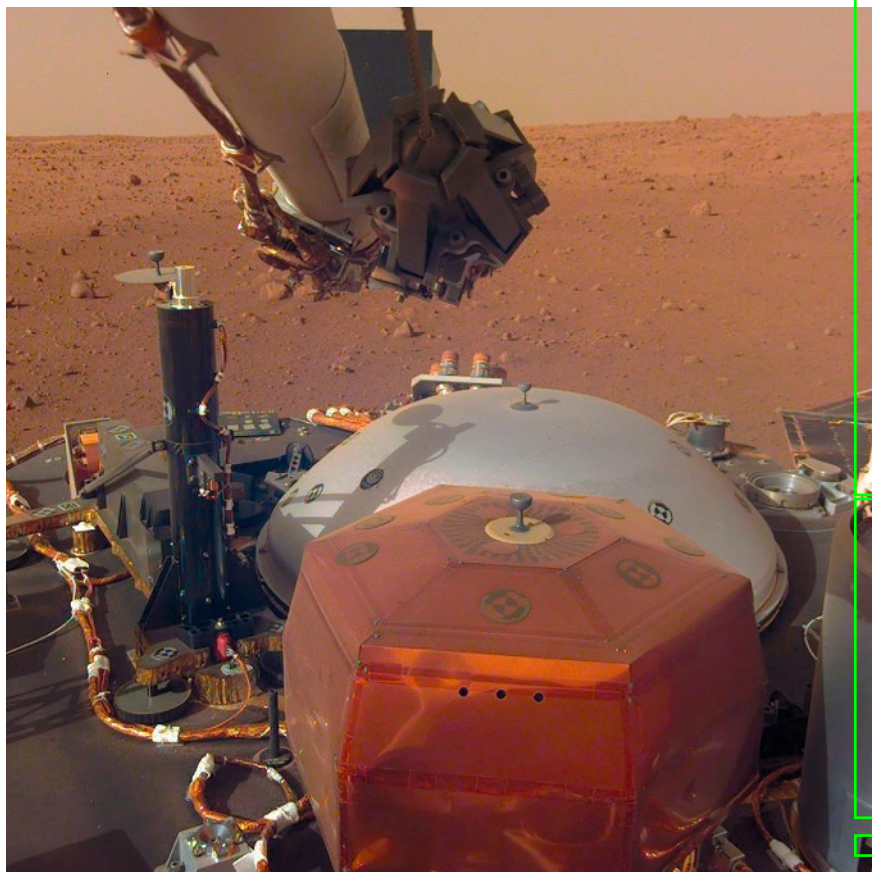
de Mars. Quand la dynamo planétaire était encore active, lors de la formation de lave (pendant une éruption volcanique ou un impact de météorite), le champ magnétique a réorienté les minéraux, tel que la magnétite, de la roche fondue. Cette orientation a été conservée lorsque la lave s'est refroidie et durcie, laissant un champ magnétique rémanent. D'après les mesures d'*InSight*, ce dernier est dix fois plus important que les estimations effectuées par les sondes en orbite. La dynamo martienne pourrait ainsi avoir été aussi intense que l'actuelle dynamo terrestre.

Actuellement, le flux de chaleur de l'intérieur vers la surface de Mars serait cinq fois plus faible que celui de la Terre. La partie basse du manteau serait soumise à de lents mouvements de convection, tandis que la lithosphère, composée de la couche supérieure et rigide du manteau et de la croûte, aurait une épaisseur comprise entre 400 et 600 kilomètres (elle est de 80 kilomètres sur Terre).

La mission *InSight* apporte également des informations sur la partie la plus superficielle de la Planète rouge, la croûte. Juste en dessous du sismomètre, celle-ci présenterait une couche de 10 kilomètres d'épaisseur très altérée et poreuse (probablement en lien avec l'activité de l'eau dans le passé martien). Reste à savoir si cette couche existe globalement ou si elle n'est que locale. Les chercheurs ont aussi identifié des discontinuités à 25 et 39 kilomètres de profondeur, qui pourraient correspondre à la base de la croûte. Là encore, il est trop tôt pour dire laquelle correspond à la frontière avec le manteau, mais ces résultats permettent d'ores et déjà d'écarter des modèles qui fixaient cette transition à près de 100 kilomètres de la surface.

L'équipe d'*InSight* espère encore récolter environ un an de données. Cela dépendra notamment de l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires qui alimentent les instruments. Mais le succès de la mission encourage à se tourner vers d'autres corps du Système solaire. La Lune fait déjà l'objet de projets pour les années à venir, mais Titan et Europe, lunes de Saturne et Jupiter, seraient aussi intéressantes, sinon plus. ■

Sean Bailly



Cette photo a été prise après l'atterrissage sur Mars de la sonde *InSight* et avant la mise en place au sol du sismomètre Seis (en rouge). Le bouclier éolien et thermique est visible au second plan (en blanc).

A. Khan *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 434-438, 2021 ;
B. Knapmeyer-Endrun *et al.*, *ibid.*, pp. 438-443 ;
S. C. Stähler *et al.*, *ibid.*, pp. 443-448

PALÉONTOLOGIE

DES PTÉROSAURES JUVÉNILES À L'AISE DANS LES AIRS

Les reptiles volants qui ont dominé le ciel jusqu'à la fin du Crétacé étaient physiquement aptes au vol dès leur prime jeunesse.

Chez de nombreuses espèces actuelles d'oiseaux, le parent revient au nid après une chasse fructueuse pour donner à manger à ses petits, encore incapables de se nourrir seuls. Une telle scène ne s'appliquait sans doute pas aux ptérosaures. Darren Naish, de l'université de Southampton, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré que chez ces reptiles volants, éteints il y a 66 millions d'années, les jeunes étaient en capacité physique de voler en battant des ailes, quasiment dès leur naissance.

Les ptérosaures forment un vaste groupe de reptiles ailés dont les plus petits représentants n'excèdent pas la taille d'un moineau, mais dont les plus grands, comme le *Quetzalcoatlus*, d'une envergure supérieure à 10 mètres, sont les plus grandes espèces volantes jamais identifiées. Cependant, l'âge auquel les jeunes ptérosaures étaient capables de voler reste une question ouverte. Les fossiles montrent des ailes déjà formées à la naissance, mais les exemples de nouveau-nés capables de voler très tôt avant la fin de leur croissance restent rares chez les animaux actuels. Darren Naish et ses collègues ont donc voulu déterminer quantitativement si les jeunes ptérosaures étaient morphologiquement aptes au vol.

Leur analyse repose sur deux paramètres : la capacité à planer, et la puissance nécessaire pour battre des ailes (ou puissance humérale). La première dépend de la charge alaire, le rapport entre la masse du volatile et la surface de ses ailes. Les chercheurs l'ont estimée à partir de l'envergure de fossiles de très jeunes ptérosaures, et l'ont comparée à celles d'espèces non aviennes actuelles capables de planer, comme l'écureuil volant ou le serpent *Chrysopelea paradisi*. La charge alaire des jeunes ptérosaures était bien plus avantageuse, et leur permettait de planer beaucoup plus loin que ces espèces, possiblement sur une centaine de mètres. Même au plus jeune âge, les ptérosaures étaient donc physiquement capables de voler plus longtemps qu'en sautant simplement d'arbre en arbre.

Mieux encore, ils disposaient d'une forte puissance humérale, essentielle au décollage et au battement des ailes. Les chercheurs l'ont



Les ptérosaures, un groupe réunissant de nombreuses espèces de reptiles volants, étaient abondants jusqu'à 66 millions d'années avant notre ère.

estimée à partir de la solidité de l'humérus des fossiles (l'os le plus sollicité dans le battement d'ailes), et de sa proportion par rapport au reste du squelette. Même s'ils préviennent que cette puissance était très variable selon les espèces de ptérosaures, Darren Naish et ses collègues suggèrent que la morphologie des jeunes était encore plus adaptée au vol que celle de leurs parents!

Avec une faible envergure, de bonnes capacités à décoller et une habileté à changer de rythme et de direction, les jeunes ptérosaures auraient plus facilement vécu en forêt. Et pour les chercheurs, ces différences entre ptérosaures juvéniles et adultes impliqueraient des habitudes de chasse et des occupations d'écosystèmes distinctes selon l'âge. Après leur croissance, leurs aînés aux mouvements plus amples devaient préférer des vols longs, possiblement en milieu marin. Les plus grandes espèces du genre, aux gabarits de petits avions, auraient même été capables de franchir des océans. ■

Valentin Rakovsky

D. Naish et al., *Scientific Reports*, vol.11, article 13130, 2021

TEST SUR LES TROUS NOIRS

Selon un théorème de Stephen Hawking, l'aire de l'horizon d'un trou noir (la frontière de non-retour dont on ne peut échapper, une fois franchie) ne peut diminuer avec le temps (sauf par « évaporation », comme l'a aussi conjecturé Hawking). Une conséquence est que lors de la coalescence de deux trous noirs, l'aire du trou noir résultant serait supérieure à la somme de celles des deux corps initiaux. Maximiliano Isi, du MIT, aux États-Unis, et ses collègues viennent de vérifier ce théorème en analysant finement les signaux des ondes gravitationnelles émises par GW150914, la première fusion de deux trous noirs observée par les interféromètres laser géants de la collaboration *Ligo-Virgo*. ■

S. B.

M. Isi et al., *Physical Review Letters*, vol. 127, article 011103, 2021

DE L'EAU LIQUIDE QUI GRIMPE À NOTRE GRÉ



En s'inspirant des arbres, cette structure tridimensionnelle exploite la tension de surface de l'eau pour la guider vers le haut. La surface d'échange maximisée avec l'air ouvre la porte à de nombreuses applications.

Faire grimper un liquide vers le haut sans apport extérieur d'énergie et sans utiliser de pompe, nous le faisons en trempant notre morceau de sucre dans le café matinal grâce au phénomène bien connu de la capillarité. Les outils qui s'appuient sur ce principe pour manipuler des liquides les confinent généralement dans des tubes étroits, sans échange possible avec le milieu extérieur. Mais Nikola Dudukovic et ses collègues, du laboratoire Lawrence-Livermore, en Californie, ont expérimenté des structures imprimées en 3D et capables de déplacer de l'eau à l'air libre dans des directions précises, dessinant par exemple une arborescence.

Les chercheurs ont mis au point des assemblages de petites cellules cubiques creuses de l'ordre de un millimètre de côté, dotées d'arêtes supplémentaires sur leurs diagonales pour densifier ce treillis. Quand le bas de la structure est plongé dans un liquide, ce dernier remonte progressivement les cubes du bas vers le haut, en longeant les arêtes diagonales puis latérales.

Le fluide tend à réduire sa tension de surface, à l'origine du phénomène de capillarité. Il adhère alors au support solide, monte et remplit progressivement tous les cubes de proche en proche. L'ascension s'arrête quand le poids du fluide soulevé compense les forces de tension de surface, maintenant le liquide en équilibre et l'empêchant de s'écouler même si ses surfaces de contact avec l'air ne sont pas horizontales.

Ces structures à l'air libre multiplient la surface d'échange entre un liquide et un gaz par rapport aux systèmes clos. Une propriété qui serait utile dans de nombreuses applications industrielles, par exemple pour accélérer les échanges de chaleur entre un liquide et l'air, ou pour capter du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. ■

V. R.

N. Dudukovic et al., *Nature*, vol. 595, pp. 31-32, 2021

LE MICROBIOTE DES TIQUES

La tique du mouton, *Ixodes ricinus*, est l'espèce de tique la plus répandue en Europe. Elle véhicule de nombreux agents pathogènes pour les humains et les animaux. En outre, cet arthropode héberge un microbiote complexe, dont Thomas Pollet, de l'Inrae, et ses collègues ont étudié les interactions. Les chercheurs ont par exemple observé que sa composition dépend du mois de l'année. Ils ont aussi noté une corrélation négative entre deux bactéries : *Borrelia miyamotoi*, responsable d'une fièvre récurrente, et *Borrelia burgdorferi*, responsable de la maladie de Lyme. La présence de l'une excluant souvent l'autre d'un même microbiote, ces deux bactéries pourraient être en compétition. À partir de ces informations, peut-être sera-t-il possible, à terme, d'utiliser les membres du microbiote des tiques pour lutter contre les pathogènes qu'ils véhiculent et limiter leur transmission aux humains. ■

V. R.

E. Lejal et al., *Microbiome*, vol. 9, article 153, 2021

BIOLOGIE VÉGÉTALE

L'ART FRACTAL DU CHOU ROMANESCO

Hérissé de cônes dont les motifs se répètent à différentes échelles, le chou romanesco se distingue par sa forme fractale. Les mécanismes génétiques à l'origine de cette autosimilarité restaient à identifier. Grâce à la combinaison d'expériences sur l'arabette des dames, une plante modèle de la même famille (*Brassicaceae*) et la modélisation de sa croissance, François Parcy, du Laboratoire de physiologie cellulaire et végétale, à Grenoble, Christophe Godin, du Laboratoire de développement et reproduction des plantes, à Lyon, et leurs collègues ont compris comment la modification de l'expression de différents gènes intervient dans la structuration de cette variété de chou-fleur.

Deux mutations suffisent pour transformer l'aspect de l'arabette. Au lieu de produire des fleurs, les méristèmes floraux (des zones à l'extrémité des tiges où des cellules souches donnent naissance aux fleurs) produisent des petites structures comparables à celles du chou-fleur. Les chercheurs ont simulé les interactions complexes de sept gènes, dont *LEAFY*, qui déclenche dans la plante sauvage le passage du méristème au stade de fleur. Normalement, *LEAFY* s'active durablement, ce qui mène à la formation d'une fleur. Ici, ce gène présente un pic d'activité avant de s'éteindre. Sa perte d'activité conduit à la formation d'une tige. Mais sa brève période d'expression suffit pour doter cette tige d'un comportement particulier: elle produit de nouveaux méristèmes floraux qui deviennent à leur tour des tiges. La croissance des choux suit sans doute un processus similaire. Alors que chez les choux-fleurs, la production des bourgeons se fait à vitesse constante, chez le romanesco, elle est de plus en plus rapide, ce qui conduit à la forme fractale et pyramidale. ■

S. B.

E. Azpeitia et al., *Science*, vol. 373, pp. 192-197, 2021

Hérissé de structures pyramidales qui se répètent à différentes échelles, le chou romanesco se distingue par une forme fractale exceptionnelle.





© Shutterstock.com/pokku

BIO-INFORMATIQUE

REPLIEMENT DES PROTÉINES : LA PERCÉE DE L'IA

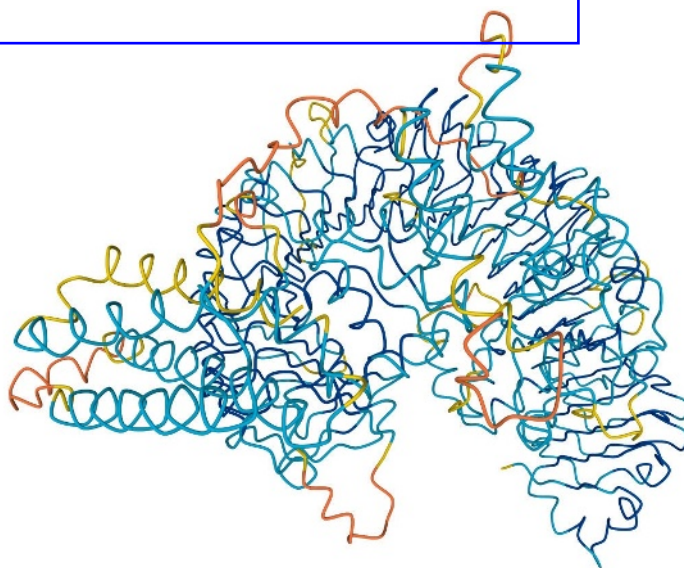
Le système d'intelligence artificielle AlphaFold prédit avec précision et en quelques heures la structure 3D d'une protéine. Une révolution en biologie structurale.

L'entreprise DeepMind marquera sans doute l'histoire des sciences. Sa nouvelle version d'AlphaFold, système d'intelligence artificielle (IA) destiné à prédire la structure 3D d'une protéine à partir de la séquence des acides aminés qui la constituent, obtient en effet des résultats impressionnants. John Jumper, Demis Hassabis et leurs collègues de DeepMind, à Londres, viennent de les publier et de donner accès au programme source d'AlphaFold. De plus, l'EMBL, le Laboratoire européen de biologie moléculaire, s'est associé à DeepMind pour créer une base de données en accès libre, qui contient déjà plus de 350 000 structures de protéines prédites à l'aide de l'IA.

Les protéines sont des molécules essentielles du vivant, et leur fonction dépend beaucoup de la façon dont la chaîne d'acides aminés « se replie » dans l'espace après sa synthèse. Plusieurs techniques existent aujourd'hui pour déterminer expérimentalement cette structure (cristallographie par rayons X, résonance magnétique nucléaire, microscopie électronique, etc.). Cependant, cela exige généralement plusieurs mois, voire plusieurs années pour une protéine donnée. À ce jour, les scientifiques ont déterminé ainsi les structures d'environ 180 000 protéines, ce qui est peu comparé aux centaines de millions de protéines dont on connaît la séquence d'acides aminés.

Une autre approche consiste à prédire la structure 3D. Les calculs de dynamique moléculaire étant généralement trop lourds, des méthodes d'IA, utilisant des réseaux de neurones artificiels à « apprentissage profond », ont été récemment développées. AlphaFold en fait partie. Ce système est entraîné avec les structures 3D connues de protéines, archivées dans la base PDB (Protein Data Bank), et s'appuie sur des comparaisons entre protéines de séquences similaires ainsi que sur les corrélations entre paires d'acides aminés et leur distance dans l'espace.

La nouvelle version d'AlphaFold prédit des structures protéiques avec une précision d'environ 0,1 nanomètre sur les positions des atomes du squelette de la molécule, soit trois fois mieux que le système concurrent le mieux



La structure tridimensionnelle de la protéine At1g58602 de la plante modèle *Arabidopsis thaliana*, telle qu'elle est prédite par le système AlphaFold. Cette protéine, liée à la résistance de la plante aux maladies, est une chaîne de 1138 acides aminés. Sa structure 3D n'est pas connue expérimentalement. Ici, les couleurs codent le degré de confiance dans la position spatiale des acides aminés (haute confiance en bleu foncé, faible confiance en orange).

placé. « Une précision assez incroyable, atteinte sur les parties de la protéine qui se replient de façon bien définie, et qui est très comparable à celle des techniques expérimentales », commente Stephen Cusack, spécialiste de biologie structurale et directeur du site grenoblois de l'EMBL.

Les prédictions réalisées sur des protéines dont la structure 3D est inconnue devront être confirmées par les techniques expérimentales. Cela prendra du temps, explique le chercheur. Par ailleurs, comme l'a souligné Janet Thornton, qui a été directrice de l'institut européen de bio-informatique (EBI) de l'EMBL, à Londres, AlphaFold ne prédit pas les structures de complexes formés avec d'autres protéines ou d'autres molécules comme l'ADN et l'ARN, et ne livre pas d'informations sur la dynamique du repliement de la molécule.

Mais en prédisant la structure 3D d'une protéine en quelques heures, AlphaFold va accélérer fortement la détermination des structures protéiques, avec de multiples perspectives en biologie fondamentale et appliquée. « Pour la biologie structurale, AlphaFold et la base de données associée constituent une révolution », conclut Stephen Cusack. ■

Maurice Mashaal

J. Jumper *et al.*, *Nature*, en ligne le 15 juillet 2021 ;
K. Tunyasuvunakool *et al.*, *Nature*, en ligne le 22 juillet 2021

Vapeur d'eau à la surface de Ganymède

La plus grande lune de Jupiter abrite un océan d'eau liquide, 160 kilomètres sous sa croûte de glace. Lorenz Roth, de l'École royale polytechnique de Stockholm, et ses collègues ont aussi trouvé des traces d'eau dans son atmosphère. L'analyse des images de Ganymède, prises dans l'ultraviolet par le télescope spatial *Hubble*, a révélé que, à l'équateur, la température s'élève assez aux heures les plus chaudes de la journée pour que la glace se sublime en vapeur.

Nature Astronomy, 26 juillet 2021

Des spirales dans l'intestin

Comment les requins peuvent-ils jeûner plusieurs jours ? Samantha Leigh, de l'université Dominguez Hills, à Carson, aux États-Unis, et ses collègues ont scanné les entrailles de plusieurs spécimens et étudié la curieuse structure en spirale présente dans leur tube digestif. Elle agit comme un système de valves, conçu par Nikola Tesla, qui ralentit un flux à sens unique sans pièces mobiles. Chez le requin, le système digestif a ainsi plus de temps pour extraire un maximum de nutriments de la nourriture.

Proc. R. Soc. B, 21 juillet 2021

Faiseurs d'influence cachés

Promouvoir ses idées par un influenceur n'est pas toujours le mieux pour susciter l'adhésion. Les chercheurs américains Douglas Guilbeault et Damon Centola ont modélisé des réseaux d'individus pour y identifier les plus efficaces pour propager une opinion. Une personne sera convaincue par une idée à contre-courant s'il la voit portée par de nombreux pairs. Une telle opinion se propage donc mieux au sein de groupes en marge, mais ayant de forts liens de proximité.

Nature Comm., 20 juillet 2021

DINOSAURES : LE DÉCLIN AVANT L'ASTÉROÏDE ?

Peu de doutes subsistent encore sur l'hypothèse d'un astéroïde qui se serait écrasé dans le Yucatán, au Mexique, il y a 66 millions d'années, et qui aurait mis un terme à l'ère des dinosaures non aviens. Mais le débat se poursuit pour déterminer si l'impact a causé leur extinction brutalement, ou s'il a porté le coup de grâce à un groupe déjà déclinant. Fabien Condamine, chercheur du CNRS à l'institut des sciences de l'évolution de Montpellier, et ses collègues apportent des arguments en faveur de la deuxième hypothèse.

Ils se sont penchés sur six familles de dinosaures présentes dans les 20 millions d'années précédant l'impact et les mieux documentées d'après les registres fossiles, dont trois familles d'herbivores et trois de carnivores. Les chercheurs ont constaté que le nombre d'extinctions au sein de chaque famille excédait le nombre d'apparitions de nouvelles espèces au Campanien (il y a 84 à 72 millions d'années) puis surtout au Maastrichtien (72 à 66 millions d'années), ce qui suggère un déclin démographique amorcé 10 millions d'années avant l'impact de l'astéroïde.

Les causes ? Un refroidissement global, accru à cette période, aurait perturbé les



Parasaurolophus est l'un des genres de dinosaures qui se sont éteints au Campanien, quelques millions d'années avant l'impact de l'astéroïde sur le Yucatán.

écosystèmes. Les chercheurs mettent aussi en avant l'interdépendance des espèces étudiées. La prolifération d'espèces émergentes chez les hadrosauridés (les dinosaures à bec de canard) aurait réduit la diversité d'autres herbivores qui partageaient les mêmes ressources de nourriture. Ces résultats suggèrent donc que la chute de l'astéroïde, marquant la fin du Crétacé, a accéléré la disparition de nombreuses familles de dinosaures déjà affaiblies, plus qu'il ne l'aurait déclenchée. ■

V. R.

F. Condamine et al., *Nature Communications*, vol. 12, article 3833, 2021

PLANÉTOLOGIE

POURQUOI MERCURE A LE CŒUR GROS

Les planètes telluriques du Système solaire présentent toutes, sous une croûte rocheuse et un manteau silicaté, un noyau de métaux liquides, principalement du fer. Celui de Mercure concentre les trois quarts de la masse de la planète, contre un tiers pour la Terre et Vénus, et un cinquième sur Mars. William McDonough, de l'université du Maryland, aux États-Unis, et Takashi Yoshizaki, de l'université du Tōhoku, au Japon, proposent une explication à cette disproportion héritée de l'époque de la formation du Système solaire. Autour de notre étoile gravitait alors un disque protoplanétaire, un nuage de gaz et de poussière. Le champ magnétique du Soleil aurait contribué à concentrer certains éléments plus près de l'étoile, dont le fer. Quand ce nuage s'est refroidi, ses composantes se sont agrégées



La proximité de Mercure avec le Soleil et l'intensité de son champ magnétique expliqueraient la masse de son noyau.

pour former les planètes telluriques, d'autant plus riches en fer qu'elles se sont constituées près du Soleil. Ce scénario expliquerait la teneur en fer de Mercure et la taille exceptionnelle de son noyau. ■

V. R.

W. McDonough et T. Yoshizaki, *Progress in Earth and Planetary Science*, vol. 8, article 39, 2021

PHYSIQUE

DES ATOMES QUI SE METTENT EN BANDES

Le point commun entre les girafes, les poissons-zèbres et les tortues: ces animaux arborent sur leur pelage, leurs écailles ou leur carapace des motifs bien ordonnés. En 1952, le mathématicien Alan Turing a développé une théorie combinant les phénomènes de réaction et de diffusion pour expliquer toutes ces formes géométriques quelles que soient leurs tailles. Yuki Fuseya, de l'université de Chofu, au Japon, et ses collègues, notamment Kamran Behnia, chercheur CNRS à l'ESPCI à Paris, ont observé ces structures de Turing à l'échelle nanométrique avec des atomes de bismuth.

Alors qu'ils voulaient étudier la topologie d'une couche de bismuth d'épaisseur monatomique déposée sur une surface de diséniure de niobium (NbSe_2), ils ont remarqué que les atomes s'y agençaient par bandes, reliées entre elles en formant les branches d'un Y. Cette configuration inattendue a rappelé aux chercheurs les motifs du poisson-ange empereur, un poisson tropical rayé de jaune et de bleu.

Ils ont alors modélisé le système en tenant compte des forces interatomiques s'exerçant sur les atomes de bismuth. L'équation obtenue s'apparente à un cas particulier de celles de Turing, et permet de prédire les motifs des

Le modèle de Yuki Fuseya et ses collègues prédit les structures de Turing dessinées par une couche d'atomes de bismuth déposée sur un substrat de diséniure de niobium.

atomes de bismuth avec une grande fidélité par rapport aux observations.

En jouant sur les paramètres du modèle, les chercheurs ont réalisé différents motifs avec la couche de bismuth: des hexagones, des rayures jointes ou toutes parallèles. Ce dernier agencement constitue un état d'équilibre stable et confère une propriété étonnante à ce matériau: en cas de perturbation, le système entier « s'autorépare » et reconstitue les bandes parallèles! ■

V. R.

Y. Fuseya et al., *Nature Physics*, en ligne le 8 juillet 2021

EN BREF

Peinture néandertalienne

Les Néandertaliens sont bien les auteurs des traces de peinture rouge sur les parois de la grotte d'Ardales, en Espagne. Francesco d'Errico, chercheur CNRS à Bordeaux, et ses collègues ont levé les doutes sur l'origine de ces colorations sur les stalagmites de la grotte andalouse, parfois attribuées à des coulées naturelles d'oxyde de fer. Les plus anciennes d'entre elles auraient 65 000 ans, faisant du site andalou l'un des plus anciens exemples connus d'art pariétal préhistorique.

PNAS, 2 août 2021

Plus éruptif par mer basse

L'activité éruptive du volcan de Santorin dépendrait du niveau de la mer. Chris Satow, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, et ses collègues ont comparé les dates des éruptions du volcan sur les derniers 360 000 ans avec le niveau des eaux. Quand celui-ci baissait de plus de 40 mètres sous son niveau actuel, le poids au-dessus de la chambre magmatique devenait assez faible pour faciliter la fracturation de la croûte et la remontée du magma vers la surface.

Nature Geoscience, 2 août 2021

Impact sur la biodiversité

Les espèces envahissantes sont l'un des principaux facteurs de déclin de la biodiversité mondiale. Céline Bellard, de l'université Paris-Saclay, et ses collègues estiment que chez les oiseaux et les mammifères, elles menacent 11 % de la diversité phylogénétique (un indicateur incluant les liens de parenté entre espèces) et respectivement 40 % et 14 % des stratégies écologiques, soit l'ensemble des comportements alimentaires, relationnels ou de défense de ces groupes.

Global Change Biol., 2 août 2021

BIOLOGIE MARINE

HALO SANS POISSONS VOLANTS

L'île de l'Ascension, dans l'Atlantique sud, sert de havre au million d'oiseaux marins qui s'y retrouvent pour se reproduire. Leur concentration est telle que les populations de poissons volants, à la base de leur alimentation, sont épuisées sur plus de 150 kilomètres autour de l'île! Sam Weber, de l'université d'Exeter, au Royaume-Uni, et ses collègues ont établi pour la première fois pour ce site ce phénomène théorisé dans les années 1960 sous le nom de « halo d'Ashmole ». Lors d'un voyage sur l'île, le naturaliste britannique Philip Ashmole avait supposé que les volatiles parcourent des distances toujours plus grandes pour chasser, jusqu'à dépenser plus d'énergie que ces voyages n'en apportent, ce qui dessine les contours du halo. Cette limitation des ressources conduit à une régulation naturelle de la population d'oiseaux. Sam



La frégate aigle-de-mer, une espèce endémique de l'île de l'Ascension, est friande de poissons volants.

Weber et ses collègues pointent aussi la fragilité du système: la moindre pression sur la population de poissons, comme la concurrence d'autres prédateurs, aurait de lourdes conséquences pour les oiseaux. ■

V. R.

S. B. Weber et al., *PNAS*, vol. 118(28), article e2101325118, 2021

CACATOËS PILLEUR DE POUBELLES

Le cacatoès à huppe jaune, espèce endémique d'Australie, a appris à se nourrir en milieu urbain en picorant dans les poubelles qu'il ouvre lui-même au préalable avec son bec et ses pattes. Barbara Klump, de l'institut Max-Planck à Radolfzell, en Allemagne, et ses collègues ont constaté que cette technique était transmise entre oiseaux par imitation. Un sondage recueillant des témoignages de riverains pendant deux ans leur a permis de suivre la propagation de ce savoir-faire à travers les quartiers de Sydney, et de confirmer qu'une grande majorité des cacatoès l'acquerraient en voyant faire un congénère. Dans certains quartiers se sont même développées des variantes locales des techniques d'ouverture de poubelles! ■

V. R.

B. Klump *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 456-460, 2021

LES EXCEPTIONNELS BRONZES DE GANNAT



Cette grande céramique emplies de centaines d'objets de bronze a été enfouie vers 800 avant notre ère, en guise de sacrifice.

DÉSINTÉGRATION DOUBLE ALPHA

Les noyaux des atomes ne sont pas tous stables. Certains se désintègrent, plus ou moins vite, suivant des processus bien connus, tels la radioactivité alpha (émission d'un noyau d'hélium) ou bêta (émission d'un électron ou d'un positron). Mais il en existe d'autres. Jean-Paul Ebran, du CEA à Arpajon, et ses collègues se sont intéressés à l'émission simultanée par certains noyaux très lourds de deux particules alpha. On pensait que ces processus étaient si rares qu'ils étaient impossibles à observer. Grâce à des calculs précis dans le cas du radium 224 et du polonium 212, l'équipe a montré que cette émission était certes rare (avec des temps de demi-vie de l'ordre de 10^{14} et 10^{18} secondes respectivement), mais à la portée des expériences actuelles. La signature serait très spécifique, car la dans la configuration la plus favorable les deux particules alpha sont émises à 180 degrés l'une de l'autre. ■

S. B.

F. Mercier *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 127, article 012501, 2021

Malgré les pillages, des archéologues de l'université Toulouse Jean-Jaurès ont réussi à sauver quelques trésors d'un grand habitat de l'âge du Bronze final, vers 800 ans avant notre ère, et situé sur un plateau naturellement fortifié et longé par la Sioule, près de Gannat, dans l'Allier. Dirigés par Pierre-Yves Milcent, ces chercheurs ignorent si cet habitat fut protégé par une palissade, mais sa portion la plus accessible l'était par des remparts enfermant une trentaine d'hectares. De nombreuses maisons s'y dressaient.

Les habitants de l'endroit sacrifiaient aux divinités en enterrant des objets de valeur – surtout des objets de bronze. Les chercheurs ont comptabilisé une vingtaine de fosses sacrificielles. La plupart ont été fouillées illicitement, mais ils ont pu, par prospection magnétique, en déceler sept par eux-mêmes, dont deux contenaient des centaines d'objets. Une fois ces fosses prélevées en bloc, leur fouille en laboratoire a révélé des vases, écrasés sous des sédiments contenant trois couches d'objets: une couverture supérieure de lames de hache disposées tête-bêche, une couche intermédiaire d'objets coupants et une couche d'objets personnels. Dans l'une des deux fosses, la couche intermédiaire contenait des outils artisanaux ou agricoles: une gouge et des faucilles; dans l'autre, il s'agissait d'armes: pointes de lance, tronçon d'épée et autres couteaux. Les couches d'objets personnels comportent surtout des panoplies de parures, sans doute déposées en une fois. Ainsi la présence d'une ceinture de cuir se déduit de celle d'une boucle, d'appliques et du creux laissé par une bande. Détails étonnants, un lambeau de cuir est toujours relié à sa pendeloque et des galets – rouges dans un cas et blancs dans l'autre – complètent les assortiments. Dans l'ensemble, les objets de bronze de Gannat évoquent déjà l'ère celtique, qui était sur le point de débiter. ■

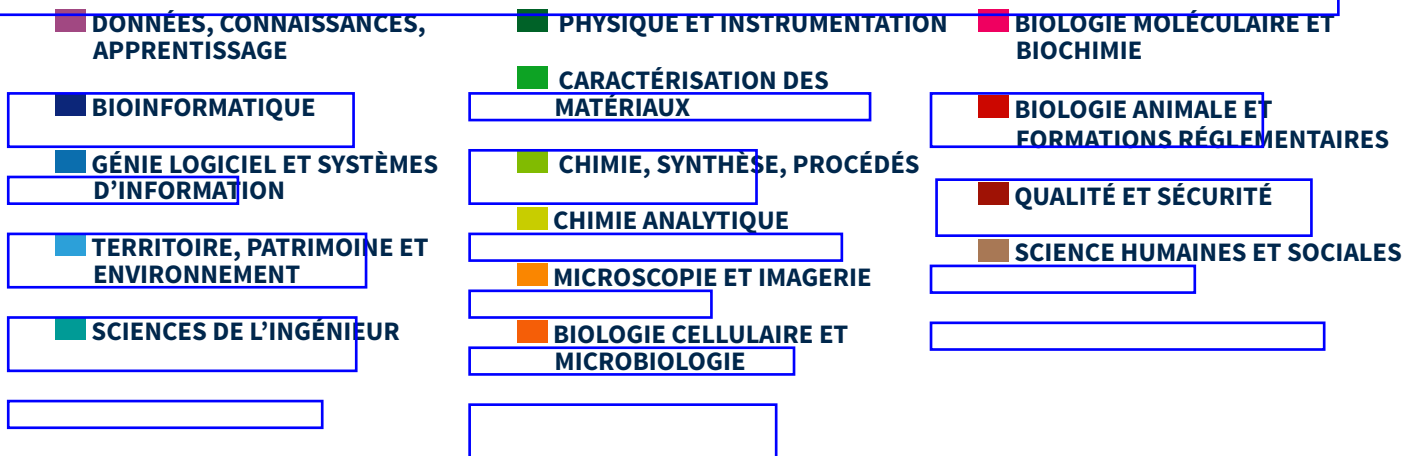
François Savatier

Laboratoire Traces à l'université Toulouse Jean-Jaurès: <https://traces.univ-tlse2.fr/>

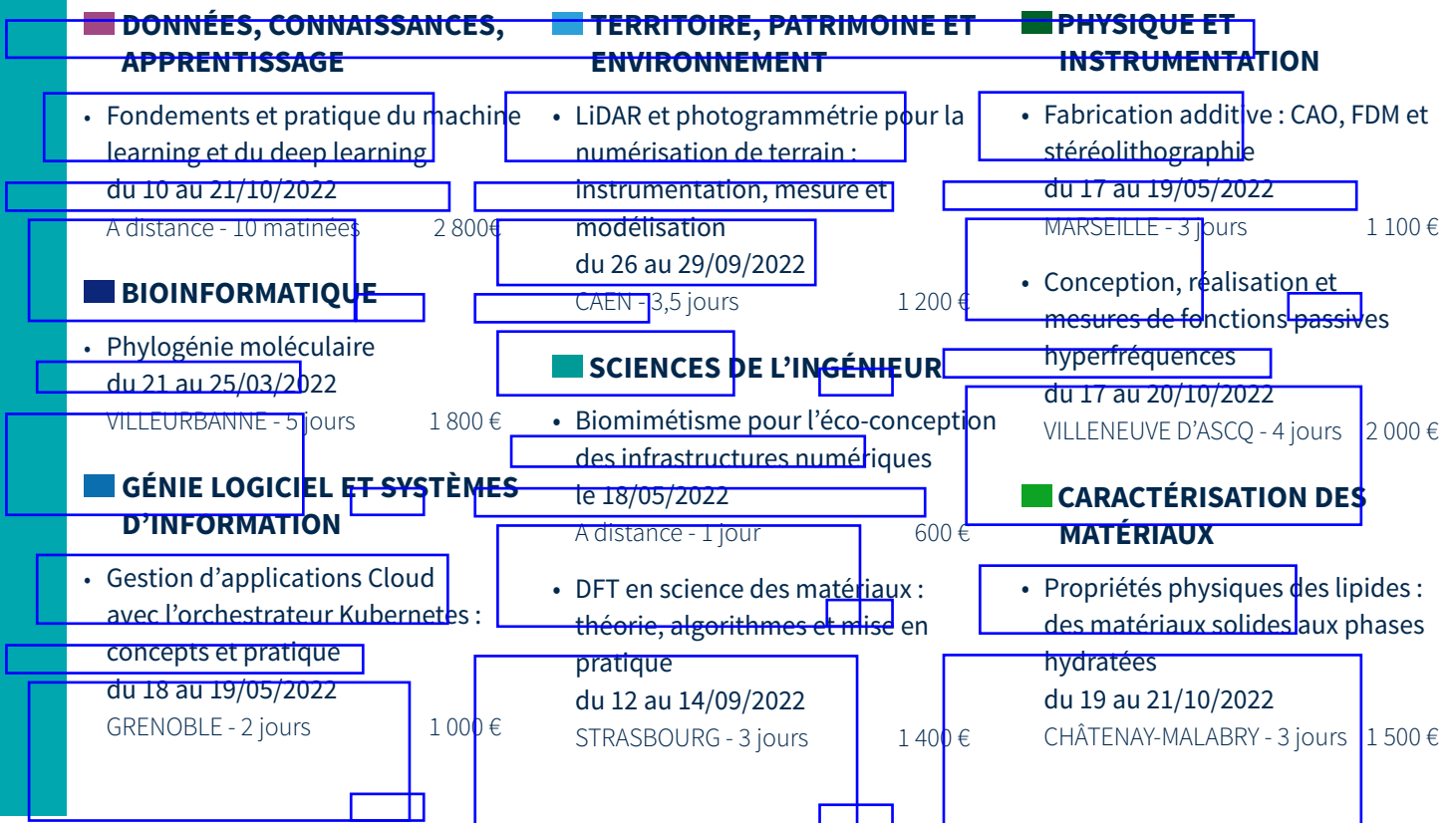
CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de 237 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2022

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



LES NOUVEAUTÉS PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2022



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

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

- Procédés d'oxydation avancée pour le traitement des eaux

du 05 au 06/04/2022

NANCY - 1,5 jour

700 €

- Conversion of biomass to specialty chemicals

du 16 au 19/05/2022

LA ROCHELLE - 4 jours

1 100 €

CHIMIE ANALYTIQUE

- Imagerie par spectrométrie de masse (MALDI imaging) pour la métabolomique ciblée et non ciblée

du 15 au 17/03/2022

STRASBOURG - 2,5 jours

1 900 €

- LC-MS et LC-HRMS pour l'analyse d'échantillons environnementaux

du 05 au 07/04/2022

CRÉTEIL - 2,5 jours

700 €

- Métabolomique ciblée et non ciblée par chromatographie et spectrométrie de masse

du 16 au 18/11/2022

STRASBOURG - 2,5 jours

1 900 €

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

- Histologie : de la préparation d'échantillons à la validation des marquages par analyse d'image

du 17 au 20/10/2022

NANTES - 4 jours

1 800 €

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

- La cytométrie en flux spectrale

du 05 au 07/04/2022

VALBONNE - 2,5 jours

1 000 €

- Virologie fondamentale, moléculaire et structurale

du 03 au 04/11/2022

GIF-SUR-YVETTE - 2 jours

1 000 €

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

- Le clonage moléculaire : évolutions techniques pour améliorer efficacité et robustesse

du 07 au 09/03/2022

LA TRONCHE - 3 jours

1 400 €

- CRISPRi : une application innovante de CRISPR pour la modulation de l'expression génique chez les bactéries

du 13 au 17/06/2022

TOULOUSE - 5 jours

2 000 €

- PCR quantitative en temps réel

du 20 au 24/06/2022

GIF-SUR-YVETTE - 5 jours

2 000 €

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

- Introduction à l'embryologie de la souris : aspects théoriques et pratiques

du 14 au 15/03/2022

A distance - 2 matinées

500 €

- Le génotypage : un design à part entière

du 04 au 05/04/2022

ILLKIRCH - 1,5 jour

800 €

- Potentiel cognitif des abeilles : découverte, mesure et valorisation

du 10 au 12/05/2022

TOULOUSE - 3 jours

1 000 €

QUALITÉ ET SÉCURITÉ

- Evaluation du risque chimique : méthode et application

du 30/06 au 01/07/2022

GIF-SUR-YVETTE - 2 jours

1 000 €

SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

- Radicalités : approches pluridisciplinaires et logiques d'actions

du 18 au 20/05/2022

TOULOUSE - 3 jours

1 300 €

- Laïcité et faits religieux : comprendre les enjeux pour gérer des situations professionnelles

du 16 au 17/06/2022

TOULOUSE - 2 jours

800 €

- L'erreur humaine : savoir en tirer les conséquences pour optimiser la performance et concevoir des systèmes homme-machine

le 28/06/2022

MARSEILLE - 1 jour

600 €

Découvrez l'ensemble des stages de formation sur cnrsformation.cnrs.fr

Pour une formation sur mesure, contactez : cfe.contact@cnrs.fr / 0169824455

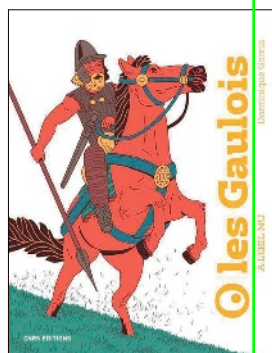
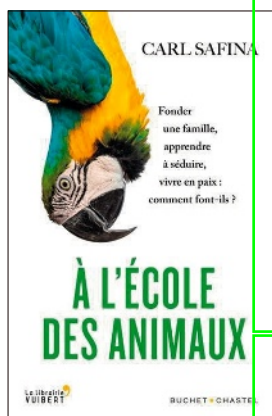
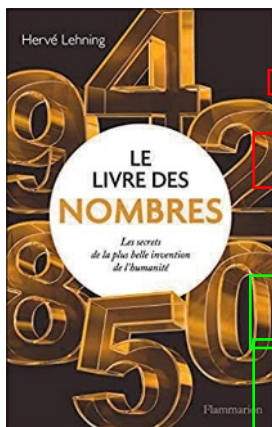


MATHÉMATIQUES

LE LIVRE DES NOMBRES

Hervé Lehning

Flammarion, 2021
352 pages, 22,90 euros



Certains animaux pourraient compter jusqu'à 6 ou 7, mais l'usage extensif des nombres reste l'apanage des humains, sans doute parce qu'il passe par l'écriture. Cette utilisation explose en ce « siècle du nombre » à travers les codes, les statistiques, et toutes les sciences. La lecture des livres de sciences anciens montre que la place de la discussion était beaucoup plus importante : aujourd'hui, les scientifiques se restreignent plus volontiers aux équations et aux nombres, et les hypothèses à la base des simulations remplacent souvent la description des appareils expérimentaux.

Aussi *Le Livre des nombres* est-il bienvenu. L'auteur « parle » des nombres et l'on ressent son empathie pour le lecteur : il s'assied à son côté pour lui montrer la splendeur des accomplissements numériques des humains et les dangers associés à des erreurs apparemment bénignes dont la portée catastrophique étonne (voir l'explosion de la première fusée *Ariane 5*). La langue de l'exposé est imagée, parfois humoristique et de compréhension aisée. Certaines petites énigmes confortent le lecteur dans son sentiment de compréhension.

La description du cheminement mathématique est historique, ce qui est valable en mathématiques où les théorèmes sont éternels (sur la base des axiomes utilisés), alors que la description des errements passés en physique ou en chimie est bien moins intéressante. On regrette toutefois que certaines notions mathématiques plus modernes tirées de la théorie des ensembles, comme les ordinaux par exemple, ne soient pas envisagées. Un bon livre qui nous rappelle ce que nous devrions savoir et maîtriser pour notre gouverne... des mathématiques.

PHILIPPE BOULANGER
Fondateur de Pour la Science

ÉTHOLOGIE

À L'ÉCOLE DES ANIMAUX

Carl Safina

Buchet-Chastel, 2021
544 pages, 24,90 euros

Avant déjà publié un best-seller traduit en français (*Qu'est-ce qui fait sourire les animaux?*) et très actif dans les médias, Carl Safina, biologiste marin passé par des organismes de protection de la nature, devient aujourd'hui l'un des vulgarisateurs majeurs du comportement animal et de l'écologie scientifique. Plus encore peut-être que Frans de Waal ou Jane Goodall, il fait un travail de communicant professionnel.

Ce nouveau livre sur la vie sociale des animaux mêle anecdotes de voyages (dans des laboratoires de terrain partout dans le monde) et découvertes récentes (surtout en éthologie, avec leurs références). Les trois parties sont centrées chacune sur un thème et un modèle : « la famille », illustrée par les mœurs des cachalots, « la beauté » (en fait, la sélection sexuelle sur les chants et les colorations) à travers les perroquets aras et « la paix » (en fait, la résolution des conflits) chez les chimpanzés.

Dans un discours paraissant faussement digressif et « à bâtons rompus », l'auteur parvient à mêler la rigueur scientifique à son talent de conteur en passant d'un animal d'un pays ou d'un thème à l'autre. Il défend entre les lignes les principes de la protection des espèces et de l'éthique animaliste avec la critique croissante de la doxa philosophique anthropocentrée.

Pour les néophytes auxquels s'adresse l'auteur, le résultat est très plaisant, notamment parce qu'il leur évite d'être lassés par les résultats arides de neurobiologistes ou par les comptes rendus complexes de psychologie expérimentale. Excellent pédagogue, il sait rendre compréhensibles et amusants des concepts complexes de biologie évolutive et d'écologie comportementale.

PIERRE JOUVENTIN
Éthologue, directeur de recherche émérite au CNRS

L'HOMME FAÇONNÉ PAR LES VIRUS

Frédéric Tangy
et Jean-Nicolas Tournier

Odile Jacob, 2021
304 pages, 21,90 euros

«**D**e nouvelles maladies naissent que nous ne saurons pas dépister dès leur origine», disait il y a un siècle le pasteurien Charles Nicolle. Cette prophétie s'illustre aujourd'hui avec le Covid-19, la maladie faisant plus peur que la guerre selon les auteurs de ce livre. Ils y retracent la fresque épique de l'histoire humaine, constamment bouleversée par les maladies épidémiques, tout en donnant un aperçu de l'incroyable diversité du monde microbien. Tous deux médecins, ils célèbrent aussi les découvertes de la science pastoriennne qui repère ces virus façonnant le destin des humains. Dans cette fresque s'insère un précieux témoignage sur la réalisation du vaccin maison contre le Covid-19, de première main puisque Frédéric Tangy est directeur du Laboratoire d'innovation vaccinale à l'institut Pasteur de Paris.

Le principe en est posé depuis quelques années: dans un vaccin vivant atténué contre la rougeole, aujourd'hui rodé, les outils de la biologie moléculaire permettent d'insérer à volonté des fragments des virus qui nous tourmentent. En théorie, il suffit d'insérer des parties du génome du virus du Covid-19, codant la fameuse protéine S (pour *s*p*i*k*e*, ou «spicule») qui le couronne. Paru en janvier 2021, au moment des premiers essais du projet français de vaccin, l'ouvrage décrit le fossé séparant la mise au point en laboratoire d'un vaccin et la fabrication industrielle qui seule permet de lancer les essais cliniques sur des populations sélectionnées avant de passer en population générale. Le livre s'arrête au plus fort du suspense de la course aux vaccins, au moment où le géant américain Merck rompt le contrat pour un vaccin jugé insatisfaisant. Alors qu'un nouveau projet de vaccin est en cours dans notre pays, on aimerait en savoir davantage sur les raisons de l'échec du premier.

ANNE-MARIE MOULIN
Directrice de recherche émérite au CNRS

LES GAULOIS À L'ŒIL NU

Dominique Garcia

CNRS Éditions, 2021
160 pages, 19 euros

Cet ouvrage, comme l'indique l'auteur, est réservé non pas «aux jeunes de 7 à 77 ans», mais à ceux qui ont «entre 15 et 95 ans» nuance... Et donc, pour séduire ce large public, il s'appuie sur des dessins et des photographies et une police très lisible.

Il se propose de combattre les mythes créés au fil des ans sur les Gaulois, en les soumettant à la rigueur de l'histoire et surtout aux résultats des fouilles; ce faisant, il s'inspire des thèses de Christian Goudineau et, bien sûr, de ses propres recherches et de celles de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (l'Inrap), qu'il préside.

Il rappelle ainsi que les Gaulois ont été en quelque sorte «inventés» par les Romains: les Lingons ignoraient qu'ils étaient Gaulois, comme tous les membres des peuples celtiques de l'Europe tempérée pendant l'âge du Fer. Certes, sans le savoir, tous parlaient une langue celtique et partageaient la même culture et la même religion.

Pour autant, une certaine diversité existait entre eux: entre le nord et le sud, entre les riches et les pauvres

et suivant les époques et tout particulièrement entre les riverains de la Méditerranée et ceux du Rhin. Les rois furent supplantés par des régimes aristocratiques, dirigeant des cités comme partout ailleurs à l'époque, qui évoluaient doucement vers une économie monétaire. Des contacts étaient aussi établis avec les voisins, Germains au nord, Ligures et Ibères au sud.

L'auteur traite ensuite l'incontournable épisode César-Vercingétorix avant de nous convier à un tour de Gaule. Dans un épilogue surprenant, il trouve «une part de Gaulois» dans Barack Obama. Mais rappelons que d'autres chefs d'État ont davantage agi pour l'archéologie gallo-romaine: Napoléon III, d'abord et surtout, et aussi François Mitterrand.

YANN LE BOHEC
Professeur émérite à l'université Paris-Sorbonne



MALADIE DE LYME, RÉALITÉ OU IMPOSTURE

Eric Caumes

Bouquins, 2021
176 pages, 18 euros

Spécialiste des maladies infectieuses, l'auteur a déterminé que moins de 15 % de ses patients consultant pour la maladie de Lyme en souffrent vraiment. Ses observations, publiées, recoupent celles d'autres équipes dans le monde. Dès lors, il avertit contre les «Lyme docteurs» qui, sans preuves suffisantes, tendent à persuader leurs patients assés par l'errance diagnostique qu'ils ont la borréliose. Ce problème de santé publique traduit, selon l'auteur, l'abandon des cas difficiles par le système hospitalier et les troubles organiques induits notamment par les maladies mal diagnostiquées.

LES JUIFS DANS L'AFRIQUE ROMAINE

Yann Le Bohec

Memoring, 2021
120 pages, 22 euros

L'historien de l'Antiquité pose ici les faits essentiels sur les communautés juives de l'Afrique du Nord romaine. Il commence par balayer les mythes suivant lesquels les Juifs de la région seraient arrivés à l'époque punique. En fait, c'est à partir de la fin du 1^{er} siècle de notre ère, puis au Bas Empire que les communautés juives – originaires pour l'essentiel de Palestine – se sont multipliées au sein de l'Afrique du Nord romaine devenue chrétienne. Très pieuses, pratiquant une belle liturgie, elles ont suscité des conversions de chrétiens et de Berbères et furent aussi en butte à une hostilité diffuse, sous Théodose I^{er} (347-395) notamment. Une chanson connue...

LES MARTINETES SE CACHENT POUR DORMIR

Franco Sacchetti

Salamandre/La Girafe, 2021
168 pages, 18 euros

Une petite fille de migrants vivant à Bari, en visite chez sa grand-mère, en ex-Yougoslavie, recueille un jeune martinet et le soigne, avec l'aide savante de son aïeule. Ce roman graphique décrit ainsi le mode de vie si particulier des martinets noirs, magnifiques voltigeurs qui ne se posent jamais, sinon pour nidifier. Le dessin naïf est destiné aux jeunes, mais la science sous-tendant le récit est fiable.



La chronique de
CATHERINE AUBERTIN

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

UNE DIPLOMATIE EN SUSPENS POUR L'ENVIRONNEMENT

**Les réunions virtuelles ne permettent pas de s'accorder
sur les textes litigieux, qui sont mis « entre crochets »
dans l'attente de rencontres réelles.**



Dans les négociations
récentes autour
des questions
de biodiversité,
le règlement
de nombreuses
questions a été reporté
à plus tard, quand
les rencontres non
virtuelles (comme
celle-ci) seront
possibles.

La quinzième Conférence des parties (COP15) de la Convention sur la diversité biologique (CDB), qui devait se tenir en Chine en octobre 2020, a été reportée à 2022 en raison de la pandémie de Covid-19. Des travaux préparatoires se sont cependant tenus. Leur déroulement *via* internet n'a pas seulement été un formidable révélateur d'inégalités dans l'accès aux moyens de communication. Il a aussi exacerbé les oppositions entre «pays développés» et «pays en développement».

Les stratégies de la coalition du groupe africain et du Brésil ont ainsi reposé sur la demande de «mise entre crochets», c'est-à-dire de gel des paragraphes litigieux, en attendant la reprise des discussions en présentiel. Ce qui a renvoyé à plus tard l'adoption du projet de résolution finale de la COP15, seules des négociations menées en présence des intéressés, autant en séance que dans les couloirs, ayant une chance d'aboutir. C'est l'une des leçons de la pandémie.

Il y a la forme, mais il y a aussi le fond. Pourquoi, comment et quoi conserver? Il n'a jamais été aisé de concilier 198 parties sur ces questions. Ni de traduire dans toutes les langues les termes de biodiversité et de conservation, dont la compréhension est propre à chaque société et qui sont

Les négociations *via* internet se transforment en marchandage

liés à des pratiques de protection de la nature perçues aujourd'hui comme imposées par les pays développés, voire comme un héritage colonial. L'histoire de la CDB peut se comprendre comme un grand marchandage où il faut faire sauter les crochets, c'est-à-dire arbitrer entre les impératifs de la conservation et ceux du développement dans le cadre d'un accord multilatéral.

À la première conférence de l'ONU sur l'environnement, à Stockholm, en 1972, les mouvements de protection de la nature ont dû s'ouvrir aux tensions géopolitiques et aux revendications de soutien au développement durable des pays pauvres. Cette exigence est à l'origine de l'appellation de la conférence de Rio, en 1992, sur «l'environnement et le développement» et de son troisième objectif, à savoir «le partage juste et équitable des avantages tirés de l'exploitation des ressources génétiques».

Cet objectif visant à répartir les coûts et les bénéfices de la conservation est devenu contraignant en 2010 avec l'adoption du protocole de Nagoya. Celui-ci garantissait un retour économique aux pays pauvres mais riches en biodiversité, et il a été la condition de leur ralliement au «Plan stratégique de conservation de la diversité biologique 2011-2020», connu sous le nom des 20 cibles d'Aichi (dont aucune n'a été atteinte...).

En vue de la COP15, un «Cadre mondial de la biodiversité après 2020», soutenu par l'Europe, doit recueillir de nouveaux engagements des pays en développement. Or, s'il est assorti d'indicateurs et de moyens de contrôle, les engagements financiers pour soutenir les actions de conservation et de développement des pays les plus pauvres restent flous.

Ces derniers s'inquiètent des nouveaux modes de connaissance liés aux pratiques d'appropriation et de manipulation du vivant. En effet, la dématérialisation des ressources biologiques mises en libre accès dans des banques internationales de gènes échappe au partage des avantages que devait réguler le protocole de Nagoya, et ce sujet de discordance a multiplié les paragraphes entre crochets.

Cela peut sembler technique ou dérisoire dans le contexte de l'effondrement de la biodiversité, mais l'inclusion des informations sur les séquences génétiques dans le champ de la convention servira sans doute de monnaie d'échange pour que soit adopté un futur cadre mondial en faveur de la biodiversité. ■



Tous les enfants font des rêves mais pour certains c'est vital de les réaliser.

*Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves
des enfants gravement malades.*

*Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie,
nous avons besoin de vous.*



Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00



La chronique de
YVES GINGRAS

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

UNE NOUVELLE PARTICULE POUR CHAQUE ANOMALIE!

En physique des particules, quand il apparaît un désaccord entre théorie et expérience, les théoriciens réagissent souvent en postulant l'existence de particules inconnues.



L'excitation des physiciens des particules à l'annonce récente (le 7 avril) d'une différence notable entre la valeur calculée et la valeur mesurée du moment magnétique du muon (voir l'article de Sean Bailly dans *Pour la Science* de juin 2021), offre l'occasion de voir à l'œuvre un vieux réflexe de physicien, rarement questionné, et de réfléchir à ce que signifie l'expression «valeur calculée».

D'abord, il est évident que les physiciens théoriciens s'ennuient de voir les vieilles théories des années 1960 constamment confirmées. Par exemple, avant 2012, nombreux étaient ceux qui espéraient que l'on ne découvre pas le boson de Higgs, car cela les aurait obligés à remettre leur imagination en branle pour inventer une théorie alternative. Pensons aussi à ceux qui espèrent toujours que la théorie de la gravitation d'Einstein (la théorie de la relativité générale) sera bientôt réfutée. Dans ce contexte, l'annonce concernant le muon a été accueillie avec enthousiasme et un physicien s'est même

empressé de prophétiser que «l'on est peut-être au début d'une nouvelle ère».

Avant de se demander ce que signifie au juste «calculer» la valeur d'une grandeur physique, observons la réaction des théoriciens à l'annonce du désaccord

Les théoriciens ont été prompts à sortir de leurs tiroirs des particules hypothétiques

entre les valeurs théorique et expérimentale du moment magnétique du muon: ils ont eu le réflexe d'en appeler à l'existence d'une nouvelle particule!

Ce réflexe est en fait mécaniquement engendré par le fait de penser dans le cadre du paradigme dominant. Celui-ci consiste en effet à tout imaginer en termes de champs, auxquels sont associées des

particules (et inversement): le champ électromagnétique a son photon, les quarks ont leurs champs spécifiques, le champ de Higgs a son boson éponyme, etc.

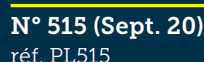
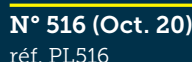
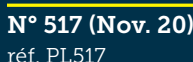
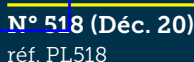
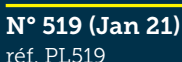
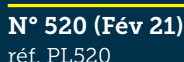
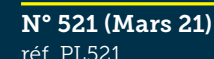
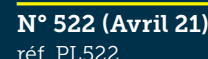
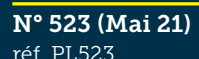
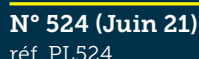
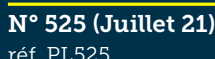
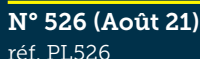
Les théoriciens ont donc été prompts à sortir de leurs tiroirs les particules «supersymétriques», les «leptoquarks», le «boson Z'», etc., imaginés lors des tentatives d'élaborer une théorie plus complète que le «modèle standard» constitué à la fin des années 1960. Certaines de ces mêmes particules avaient aussi été invoquées pour rendre compte de la mystérieuse «matière noire», censée expliquer la gravité qui semble manquer à l'échelle cosmique.

Bien sûr, seul l'avenir dira si ces particules hypothétiques se cachent vraiment dans la nature et si elles expliquent correctement les phénomènes. Ce qui frappe cependant ici, c'est que chaque anomalie appelle sa particule, un peu comme chaque écart de mesure dans l'astronomie de Ptolémée appelait son épicycle...

Un autre aspect intéressant de l'affaire du muon tient au fait que les physiciens avaient tendance à prendre pour acquis la valeur théorique connue jusque-là, comme si «calculer» était une opération qui ne peut que mener sans problème à une seule valeur, les mathématiques étant logiques et strictement déductives. Or il s'agit là d'une simplification abusive: les méthodes de calcul sont aussi diverses que les méthodes expérimentales et peuvent faire intervenir diverses hypothèses et simplifications plus ou moins valides.

Cela a heureusement été rappelé par une équipe de théoriciens (ils sont 14!) qui, en avril 2021, ont publié dans la revue *Nature* une nouvelle valeur théorique, finalement plus proche de la valeur expérimentale. Ils ont dû eux aussi introduire des hypothèses auxiliaires, et l'avenir dira si ces nouveaux calculs sont meilleurs. Il est donc tout à fait possible que la théorie actuelle fonctionne encore et que les particules exotiques doivent retourner dans les tiroirs... jusqu'à ce que survienne la prochaine anomalie, qui excitera de nouveau la communauté des théoriciens impatients de voir venir une révolution scientifique. ■

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepourlascience.fr

☒ **OUI**, je commande des numéros de **Pour la Science**, au tarif unitaire de 9,40 €

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

1^{re} réf. $0.1 \times 9,40 \text{ €} = 9,40 \text{ €}$

2^e réf. _____ x 9,40 € = _____ €

3^e réf.  $\times 9,40 \text{ €} =$  €

4^e réf. x 9,40 € = €

5^e réf. _____ x 9,40 € = _____ €

6^e réf. $\times 9,40 \text{ €} =$ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

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

~~Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement~~

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom:

Prénom:

Adresse:

Code postal Ville:

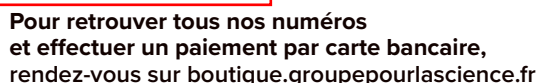
Téléphone

Courriel :

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque à l'ordre de *Pour la Science***
en nous retournant ce bulletin complété



**Pour retrouver tous nos numéros
et effectuer un paiement par carte bancaire,
rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr**

L'ESSENTIEL

> Notre organisme héberge des bactéries, certaines en symbiose, d'autres pathogènes, qui produisent une bonne partie de nos odeurs corporelles.

> Chacune délivre un cocktail chimique spécifique selon son propre métabolisme et les sécrétions humaines qu'elle dégrade.

> Ces signatures olfactives offrent de nouvelles possibilités de diagnostic de maladies infectieuses ou de cancers.

> Des animaux renifleurs (chiens, rats) entraînés et des nez électroniques ont déjà fait leurs preuves.

LES AUTEURS



GENEVIÈVE HÉRY-ARNAUD
directrice du groupe Microbiote de l'unité Inserm Génétique, génomique fonctionnelle et biotechnologies, et du laboratoire de bactériologie de l'hôpital universitaire de Brest



GEORGES TRAVERT
maître de conférences et praticien hospitalier honoraire au Laboratoire de biophysique médicale du CHU et à l'université de Caen-Normandie

Ce que nos odeurs disent de nous

Pourquoi dégageons-nous des odeurs ? En explorant les dessous de nos fragrances, biologistes, chimistes et médecins ont eu du nez : nos effluves ressemblent à une sorte de code que l'on commence à exploiter dans les diagnostics de santé.

« **P**renez leurs pieds, par exemple, eh bien là ils sentent comme un caillou lisse et chaud ; ou bien non, plutôt comme du fromage blanc... ou comme du beurre, comme du beurre frais, oui, c'est ça : ils sentent le beurre frais. Et le reste du corps sent comme... comme une galette qu'on a laissé tremper dans le lait. Et la tête, là, l'arrière de la tête, où les cheveux font un rond, [...] c'est là, très précisément, qu'ils sentent le plus bon. Là, ils sentent le caramel. » Quand la nourrice de Jean-Baptiste Grenouille, le héros du *Parfum*, de Patrick Süskind, dépeint par ces mots la bonne odeur des nourrissons, c'est pour expliquer pourquoi elle ne veut plus s'occuper de l'enfant : celui-ci n'a aucune odeur, ce qui, pour elle, l'apparente au Diable...

De fait, nous l'avons tous expérimenté, chaque humain a sa propre odeur. Et même, chaque maladie produit ses propres effluves. Si cette propriété est connue et utilisée depuis fort longtemps, cela ne fait que quelques dizaines d'années que l'on a identifié les responsables de ces émanations : les bactéries qui peuplent notre corps. Aujourd'hui, on commence à prendre la mesure du potentiel de cette découverte en matière de santé. Analyser l'air exhalé pour diagnostiquer la tuberculose, un cancer du sein ou, plus récemment, le Covid-19, lutter contre le paludisme grâce à des pièges odorants à moustiques émettant les odeurs corporelles qui les attirent ou même simplement détourner les propres armes de la sueur pour modifier son odeur... Les applications ouvertes par l'étude des composés organiques volatils issus de notre



organisme se multiplie. Et certaines sont déjà opérationnelles.

DES ODEURS ET DES BACTÉRIES

Pour partie, notre odeur corporelle dépend de notre sexe, de notre âge, de nos émotions, de notre alimentation ainsi que des produits d'hygiène que nous utilisons. Elle varie aussi selon nos activités physiques et les parties de notre corps. Mais là n'est pas le principal ! Ce sont les 30000 milliards de bactéries commensales avec lesquelles nous vivons en symbiose (« commensal » signifie « qui partage la même table ») qui se rappellent à nous, entre autres, par l'odorat. Et de deux façons. D'une part, en fermentant nos sécrétions inodores qu'elles transforment en substances volatiles caractéristiques, pour la plupart odorantes, d'où résulte la variété d'odeurs des différentes parties de notre corps (bouche, vagin, intestin, pieds ou aisselles...). D'autre part, en produisant des composés organiques volatils odorants par leur propre métabolisme.

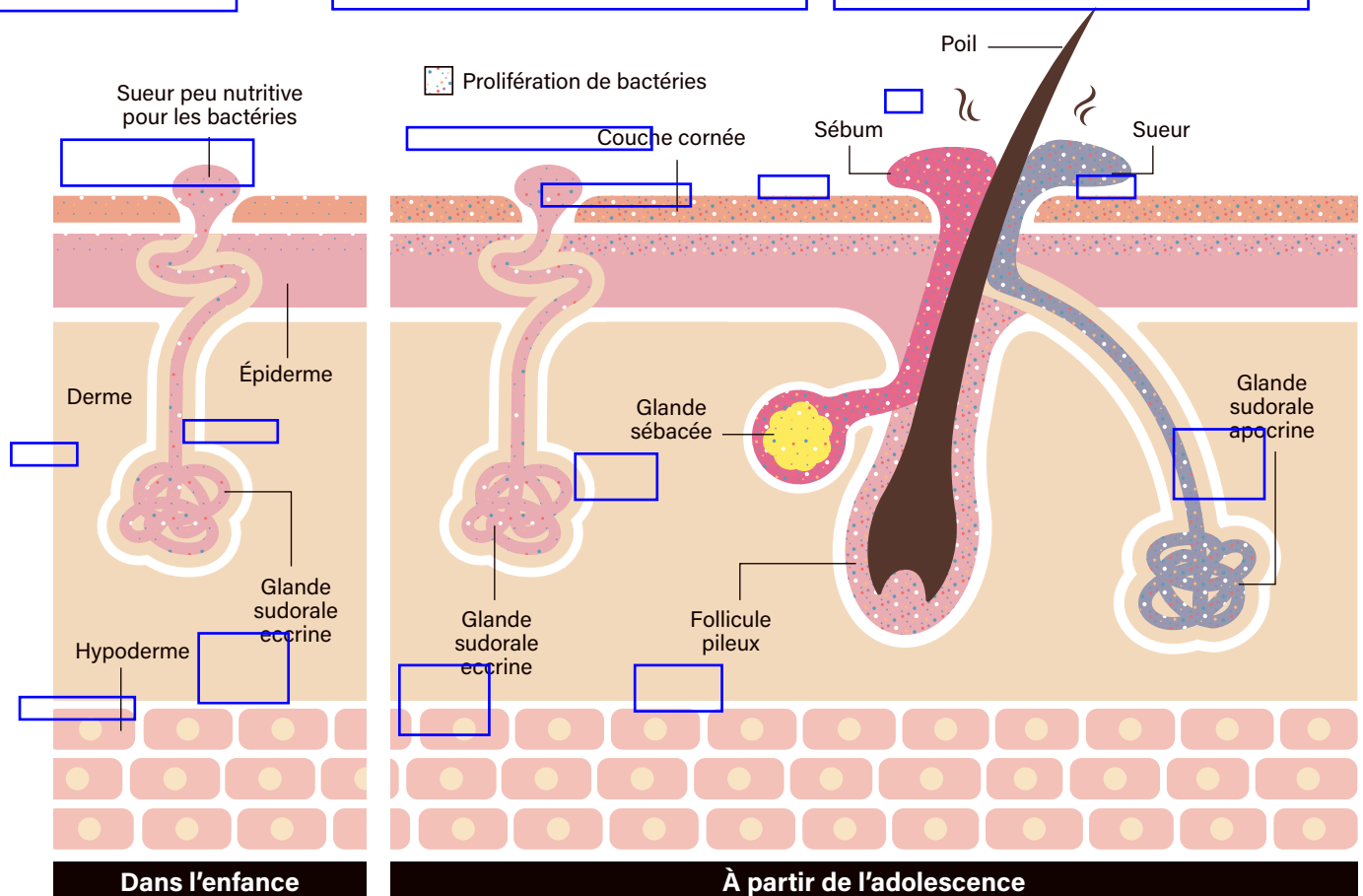
Faisons d'abord le tour de nos fermentations et sécrétions. Les milieux nourriciers que notre corps offre aux bactéries sont nombreux : débris alimentaires de la bouche, contenu intestinal et pulmonaire, cellules mortes de la peau, sécrétions vaginales et

cutanées, etc. Prenons l'exemple de la peau, une surface de 1,5 à 2 mètres carrés chez l'adulte : sur ce terrain hétérogène sont produites en permanence des sécrétions de composition variable, toutes inodores.

Certaines sécrétions cutanées sont gazeuses et assurent la thermorégulation de notre corps : elles sont liées à l'évaporation de l'eau par les pores de la peau sans sudation apparente (on parle de « perspiration insensible »). D'autres sont liquides : selon le système glandulaire en jeu, il s'agit de sueur qui s'évacue par les pores de la peau lorsque nous transpirons, ou de sébum. Certaines bactéries utilisent les composés contenus dans ces sécrétions comme nutriments. En les dégradant par voie enzymatique, elles produisent d'autres composés – des composés organiques volatils – capables de s'évaporer très facilement. Ce sont eux qui sont responsables des odeurs corporelles.

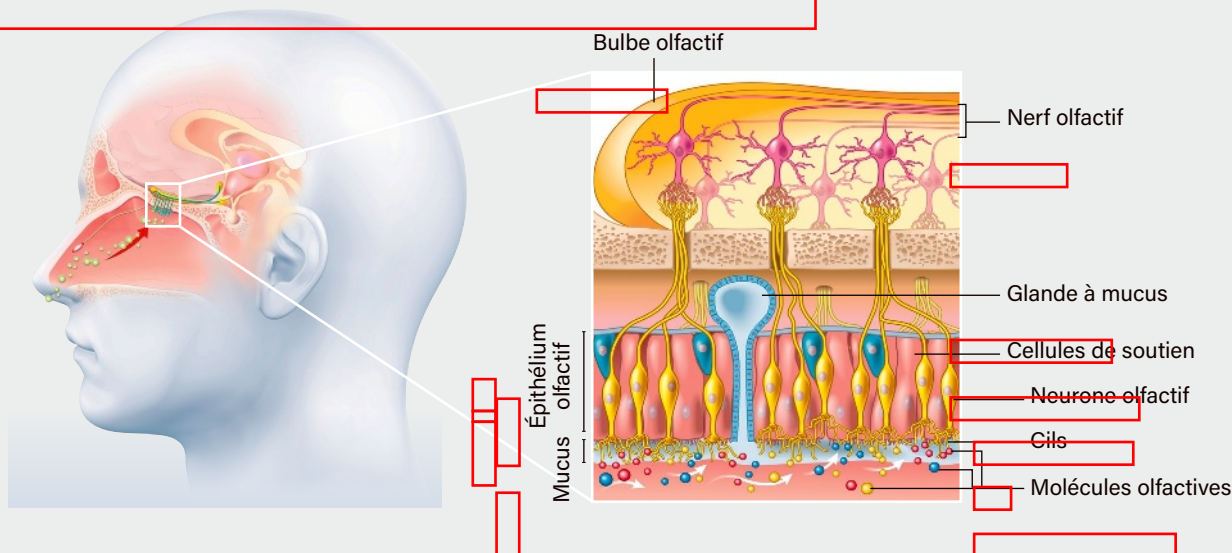
Il existe trois systèmes glandulaires : les glandes eccrines, apocrines et sébacées (voir la figure ci-dessous). Les glandes eccrines, actives dès la naissance et réparties sur tout le corps, produisent une sueur limpide, de pH 4 à 6,5, composée d'eau et d'ions à 99%, d'urée et de traces de composés organiques (cette sudation joue un rôle clé dans la thermorégulation du corps en cas d'effort physique).

À partir de l'adolescence, les glandes sébacées et apocrines entrent en action, produisant respectivement du sébum et de la sueur, qui contiennent des composés inodores propices aux bactéries. Celles-ci s'en nourrissent et produisent des molécules (mal)odorantes.



DES ODEURS À LEUR PERCEPTION

Si la surface réceptrice des molécules odorantes dans la cavité nasale ne mesure que 2 à 3 centimètres carrés, notre système olfactif est capable de distinguer plus de 1 000 milliards d'odeurs.



L'odeur est avant tout une sensation émotionnelle, très personnelle. Chacun a pu en faire l'expérience. Sa perception passe par notre odorat, un sens chimique, au même titre que le goût. Si, depuis les travaux d'Andreas Keller, à l'université Rockefeller, à New York, et son équipe, en 2014, l'on sait que le nez d'un humain entraîne peut distinguer au moins 1 000 milliards d'odeurs environ (le développement ancestral de l'art de la parfumerie et de l'art culinaire l'atteste), notre système olfactif est sans doute le système sensoriel le moins connu.

Il a fallu attendre l'avènement de technologies d'analyse comme la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse, dans les années 1970, pour que des chimistes parviennent à établir des liens entre structure moléculaire et type d'odeur. L'essor de la neurobiologie, à la fin des années 1980, a ensuite permis d'entrevoir les liens entre ces molécules et la sensation d'odeur. Enfin, la découverte en 1991 par les chercheurs américains Linda Buck et Richard Axel d'une nouvelle famille de plusieurs centaines de gènes correspondant aux récepteurs olfactifs a permis de mieux comprendre le système olfactif. Leurs travaux ont été récompensés par le prix Nobel de physiologie ou de médecine en 2004.

Voyons comment se déroule notre perception olfactive. Les préalables pour qu'une molécule soit odorante sont qu'elle soit en quantité suffisante dans l'air inspiré et qu'elle puisse s'évaporer facilement (se transformer en substances volatiles). Pour qu'elle soit perçue, il faut ensuite qu'elle rencontre notre cerveau en se fixant

à au moins un de nos récepteurs olfactifs. Ces protéines se situent sur les cils terminaux de nos neurones olfactifs, baignant dans notre mucus nasal, un milieu protecteur et hydrophile de 2 à 3 centimètres carrés dans la partie supérieure de notre cavité nasale. Cette rencontre n'est possible que si la molécule est suffisamment hydrophile pour traverser la couche de mucus, ou si elle se lie à des protéines de transport du mucus, qui l'acheminent alors aux récepteurs olfactifs.

Un humain produit environ 300 à 400 types de récepteurs olfactifs

Grâce aux travaux de Linda Buck et Richard Axel, on sait qu'il existe, chez l'humain, environ 300 à 400 types de récepteurs olfactifs et qu'un neurone olfactif ne porte qu'un seul type de récepteur. Quand une molécule volatile se fixe sur un de ces récepteurs, cela déclenche, via un type de protéines (les protéines G), une cascade moléculaire qui crée un influx nerveux. Tous les neurones olfactifs qui portent ce même type de récepteur convergent et apportent au cerveau un signal « pur » qui correspond à l'interaction chimique de la molécule et de ces

récepteurs. Comme un instrument produirait une note précise. Mais un type de récepteur peut fixer différentes molécules, et une molécule peut activer plusieurs récepteurs. On comprend vite la complexité des combinaisons possibles qui se traduisent par une variété d'accords olfactifs, pour reprendre l'analogie musicale.

La perception olfactive est particulièrement complexe. Ainsi, des molécules de structures proches ont parfois des odeurs très différentes. Y compris quand il s'agit d'énantiomères, c'est-à-dire de deux molécules identiques mais non superposables, comme le sont nos deux mains. Cet apparent paradoxe témoigne de l'importance fondamentale de la complémentarité de forme entre le site de liaison du récepteur olfactif et la molécule, tout comme il est impossible de placer sa main gauche dans l'empreinte moulée de sa main droite. De même, une molécule ne donne pas la même sensation odorante selon sa concentration : à faible concentration, elle se fixe en priorité sur les récepteurs olfactifs de plus forte affinité, puis, quand ceux-ci sont saturés, sur des récepteurs de moindre affinité, créant un signal neuronal différent.

C. Bushdid *et al.*, Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli, *Science*, vol. 343, pp. 1370-1372, 2014

Les glandes apocrines et sébacées ne deviennent actives, quant à elles, qu'après la puberté, ce qui explique que l'odeur corporelle d'un jeune enfant soit si différente de celle d'un adolescent ou d'un adulte. Elles se situent à l'intérieur des follicules pileux des zones génitales, des aréoles mammaires, du pourtour du nombril et des aisselles. Les glandes apocrines produisent une sueur laiteuse de pH 6 à 7,5, riche en matière organique (protéines, sucres et lipides), dont le rôle thermorégulateur est auxiliaire par rapport à celui des glandes eccrines. Les glandes sébacées sécrètent également du sébum, de pH 4,5 à 5,5, riche en matière grasse.

UN MICROBIOTE VARIÉ

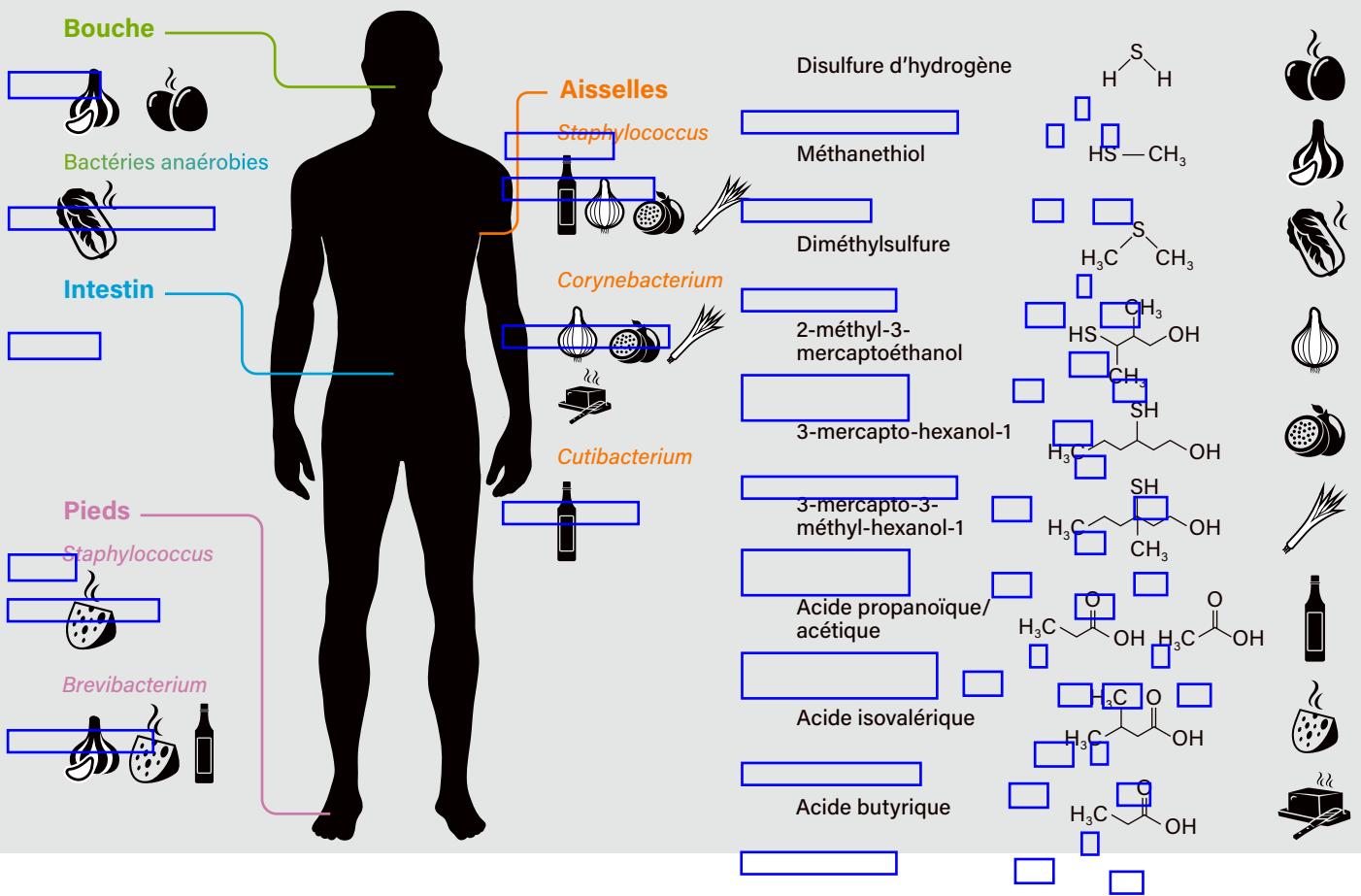
Côté bactéries, la variété est également de mise. Grâce aux techniques de métagénomique, de nombreuses équipes de recherche se sont attelées à caractériser l'ensemble de nos bactéries, ou microbiote bactérien, *via* l'étude de leur génome, dans la foulée du programme de recherche américain Human Microbiome Project lancé en 2008. Cela a révélé l'existence de microbiotes divers et variés selon les sites anatomiques et les individus.

Reprenons l'exemple du microbiote cutané: il est abondant et diversifié, avec parfois plus

Notre corps héberge différents microbiotes bactériens, certains aérobies (qui ont besoin d'oxygène), d'autres anaérobies. Selon leurs bactéries spécifiques, ils produisent des molécules aux odeurs caractéristiques : ail, oignon, poireau, œuf ou chou pourris, beurre rance, vinaigre, fromage, fruit exotique...

de 1000 espèces bactériennes commensales. Assez stable chez un individu, il présente une grande variabilité interindividuelle. Par ailleurs, il n'est pas réparti de façon uniforme et différentes espèces bactériennes occupent des zones anatomiques distinctes (*voir les figures pages 29 et 30*). Certaines colonisent les zones grasses ou séborrhéiques (visage, occiput, intérieur des oreilles, haut du torse et dos), d'autres préfèrent les zones humides (fosse nasale, aisselles, espaces interdigitaux, sillon fessier, nombril...), d'autres encore, seulement les zones sèches comme les bras ou les fesses.

En outre, certaines bactéries sont anaérobies: leur métabolisme suppose l'absence d'oxygène. Elles vivent dans nos intestins, notre bouche, ou encore dans nos poumons ou les couches profondes de notre microbiote cutané que sont l'épiderme et le derme. Tous ces microbiotes exercent une double action bénéfique pour notre santé: ils participent à l'éducation du système immunitaire et créent un effet barrière contre les bactéries pathogènes, en occupant le terrain et en consommant les nutriments disponibles. Mais cette belle médaille a son revers: la production de molécules dont nous considérons certaines comme malodorantes, une notion surtout personnelle et culturelle (*voir l'article page 34*).



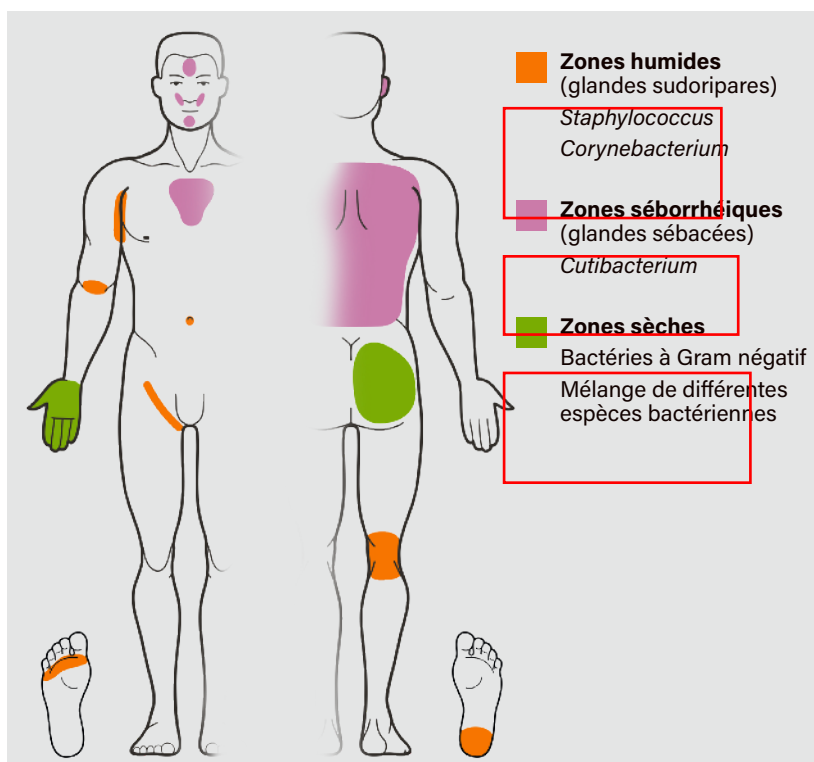
Chaleur et humidité favorisent le développement de bactéries. Voyons de plus près lesquelles profitent de nos sécrétions et les molécules qu'elles produisent par fermentation, sur nos pieds et sous nos aisselles, deux zones sujettes à la transpiration. Parmi les molécules que nous considérons en général comme nauséabondes, on trouve le méthannethiol ($\text{CH}_3\text{-SH}$) et toute la série de thiols à odeur de chou pourri et de poisson en décomposition, une ribambelle d'acides gras à chaîne courte ou moyenne, du diacétyl ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$), des thioalcools (alcools comportant en plus un ou plusieurs atomes de soufre) ou encore l'ammoniac (NH_3), dont l'odeur est assimilée au poisson pourri, et le sulfure d'hydrogène (H_2S), qui évoque l'œuf pourri.

QUELLES ODEURS SUR QUELLES PARTIES DU CORPS ?

Chaque bactérie produit une molécule donnée en dégradant des composés chimiques spécifiques. Si nous ne sommes pas égaux face aux odeurs que distille notre corps, c'est aussi une question de densité de population bactérienne. Ça sent les pieds ? C'est probablement dû à *Brevibacterium*, qui produit du méthannethiol en dégradant la méthionine (acide aminé soufré) de la peau morte et transforme les acides aminés leucine et isoleucine en acide isovalérique ($\text{C}_4\text{H}_9\text{-COOH}$). Cet acide, également produit par *Staphylococcus epidermis*, autre membre éminent du microbiote cutané, a l'odeur caractéristique de fromage fort. Une association sensorielle qui ne doit rien au hasard : l'industrie fromagère utilise la bactérie *Brevibacterium linens* pour l'affinage du camembert et du munster.

Poursuivons notre exploration du côté des aisselles. Cette zone humide présente une forte densité de glandes apocrines et sébacées. Les odeurs d'aiselles dépendent de la nature des sécrétions locales et de la composition du microbiote cutané. La présence de poils favorise leur diffusion. Ce microbiote, comme ceux des intestins et des poumons, dépend du sexe... Ainsi, on décrit les odeurs axillaires des femmes comme étant à dominante de fruits exotiques et d'oignon, tandis que les aisselles masculines évoquent le beurre rance et le fromage. De même, le stress (anxiété, peur, douleur) augmente la transpiration et la sueur émotionnelle peut provoquer un changement d'odeur en stimulant les glandes apocrines. Ces odeurs sont essentiellement produites par trois genres de bactéries présentes après la puberté : *Cutibacterium*, dont l'espèce *C. acnes* est responsable de l'acné, *Staphylococcus* et *Corynebacterium*.

L'intensité de l'odeur des aisselles est principalement liée à la densité de bactéries du genre *Corynebacterium*, aidées de quelques



Selon la région de la peau et ses sécrétions, le microbiote bactérien varie et est dominé par différents types de bactéries.

autres comme *Staphylococcus hominis*. Si le genre *Corynebacterium* (notamment les espèces *C. mucifaciens* et *C. tuberculoostearicum*) mérite la palme des mauvaises odeurs, c'est pour son rôle dans la production de deux types de molécules à partir de précurseurs inodores sécrétés par les glandes apocrines : des acides gras et les redoutables thioalcools. *Corynebacterium* produit également de l'acide butyrique à partir d'acides gras à longue chaîne. *Staphylococcus* et *Cutibacterium*, pour leur part, participent à la production d'acides gras à chaîne courte comme l'acide acétique et l'acide propionique (à l'odeur vinaigrée) à partir du glycérol et de l'acide lactique.

Sous les aisselles, on retrouve trois thioalcools issus de l'activité enzymatique de *Corynebacterium tuberculoostearicum*, mais aussi de *Staphylococcus hominis*, *S. haemolyticus* et *S. lugdunensis* : le 2-méthyl-3-mercaptoputanol-1 ($\text{C}_4\text{H}_9\text{S-CH}_2\text{OH}$), à l'odeur soufrée qui évoque l'oignon ; le 3-mercaptopentanol-1 ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{S-CH}_2\text{OH}$), à l'odeur de soufre et de fruit tropical ; le 3-méthyl-3-mercaptopentanol-1 ou 3M3SH ($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{S-CH}_2\text{OH}$), à l'odeur soufrée, d'épices et d'herbe coupée.

Un mot enfin sur le diacétyl, que l'on retrouve sous les aisselles, sous les pieds et sur la tête : il est produit par la fermentation bactérienne de plusieurs acides gras de la sueur. Cette petite molécule, dont le seuil de détection olfactive est très faible, présente la

particularité de créer des sensations odorantes différentes (caramel, beurre ou fromage) selon sa concentration.

CONTRÔLER LES ODEURS?

Après ces énumérations pas forcément appétissantes, y a-t-il moyen d'atténuer certaines de nos émanations odorantes? Deux pistes sont à l'étude. La première consiste à moduler le microbiote cutané par un transfert de microbiote axillaire, tout comme on transpose le microbiote fécal pour traiter certaines maladies intestinales. Chris Callewaert, à l'université de Gand, en Belgique, et ses collègues mènent un essai clinique dans ce sens, où les participants utilisent pendant un mois un spray contenant des bactéries connues pour être associées à une bonne odeur des aisselles, et pendant un mois un placebo, sans que ni eux ni les chercheurs ne sachent par quel spray ils ont commencé.

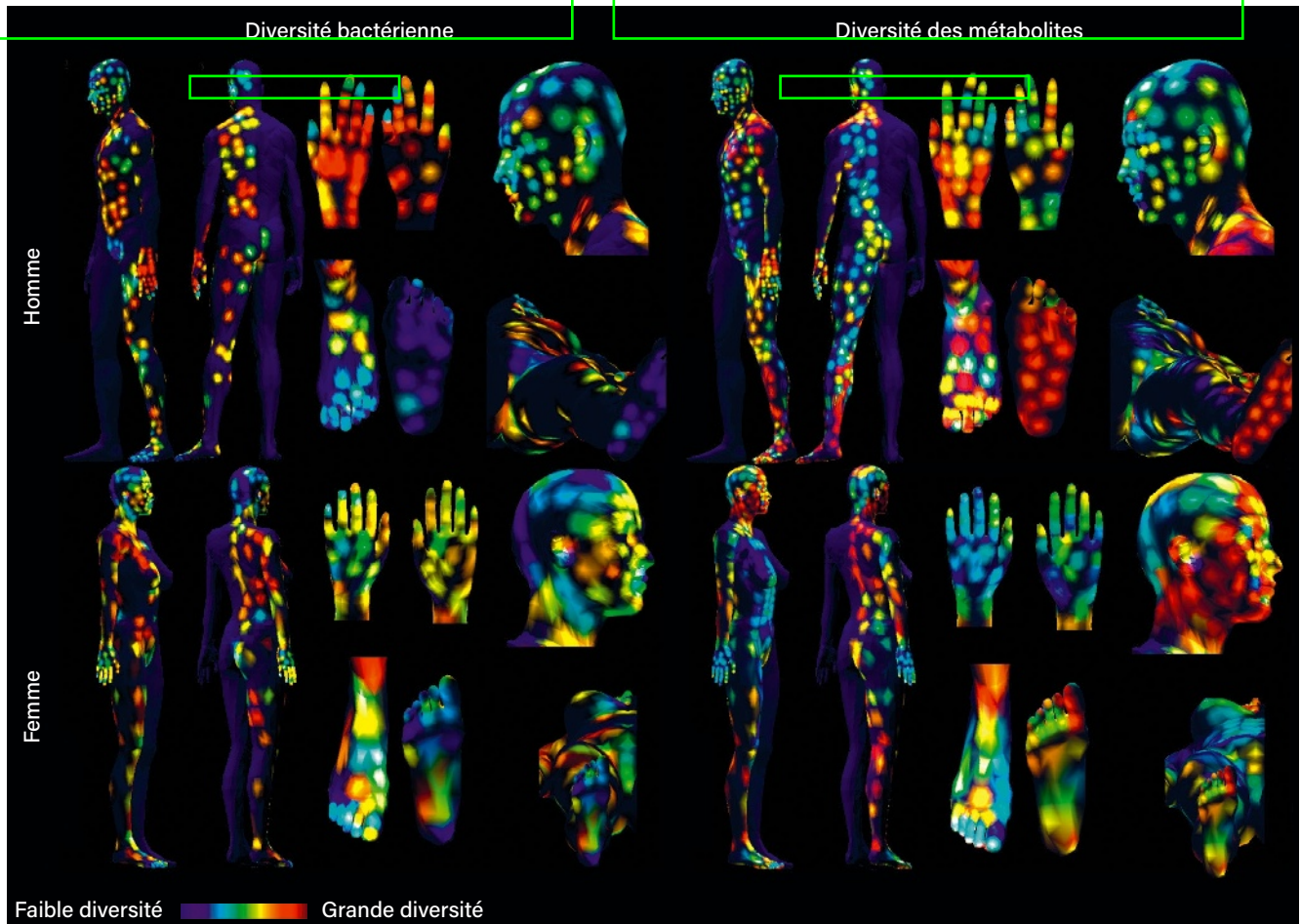
La seconde piste consiste à appliquer localement des probiotiques (bactéries ou levures) et est explorée par l'industrie cosmétique. Ainsi, la connaissance de nos microbiotes (oral, cutané, intestinal, pulmonaire...) permettrait de mieux cerner et, pourquoi pas, de modifier notre personnalité odorante.

Au-delà de l'envie de plaire et de sentir bon, moduler le microbiote cutané pourrait être d'un grand secours pour ceux qui se font dévorer par les moustiques, un désagrément qui se solde par des démangeaisons mais aussi par un risque accru de graves maladies telles que le paludisme, le chikungunya ou la dengue. Là encore, des variations interindividuelles font que l'on attire plus ou moins ces insectes piqueurs. Les femelles de moustiques sont en effet guidées vers leur victime par des signaux physiques, visuels, thermiques, mais aussi olfactifs.

DIVERSITÉ MICROBIENNE

Chez un homme (en haut) et une femme (en bas) qui ne se sont pas lavés depuis trois jours, à l'aide d'un coton-tige, prélevez environ 400 échantillons à différents endroits de la peau, analysez leur composition bactérienne (par métagénomique) et leur composition en métabolites (par spectrométrie de masse), puis sur chaque corps, représentez la diversité bactérienne (à gauche) et la diversité chimique (à droite) de chaque échantillon.

C'est l'expérience qu'Amina Bouslimani, à l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont menée en 2015 sur deux individus. Résultat : la diversité bactérienne varie d'un individu à l'autre, et aucune corrélation n'est observée entre diversité bactérienne et diversité chimique, signe que la composition moléculaire sur la peau n'est pas seulement définie par le microbiote, mais aussi par nos habitudes de vie, notamment les produits cosmétiques et d'hygiène.



Depuis 2009 et les premiers travaux de Niels Verhulst et ses collaborateurs, à l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, on sait que, d'une façon générale, les personnes qui attirent les moustiques présentent une plus forte densité bactérienne sur la peau, doublée d'une diversité plus faible. Cette même équipe a établi en 2011 que les composés organiques volatils que produit *Staphylococcus epidermis* sont très attractifs, alors que ceux de *Pseudomonas aeruginosa* ne le sont pas.

À plus grande échelle, c'est la lutte contre le paludisme qui pourrait bénéficier de ces recherches. Une des pistes étudiées pour éradiquer cette maladie consiste à utiliser des pièges à moustiques pourvus d'appâts à base de composés organiques volatils que produisent les individus présentant une forte attractivité pour ces insectes. Avec l'espoir un jour de mieux contrôler les populations de moustiques sans utiliser d'insecticides. En France, en 2014, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a soutenu un projet (le projet Attractigre) qui a permis d'identifier des bactéries cutanées attractrices du moustique-tigre (*Aedes albopictus*). Il reste néanmoins à démontrer la faisabilité de ces pièges à moustiques odoriférants.

PISTER LES MALADIES À L'ODEUR

En plus de produire des odeurs à partir de sécrétions humaines inodores, certaines bactéries fabriquent, par leur propre métabolisme, des composés organiques volatils aux odeurs caractéristiques. Les bactériologistes expérimentés et dotés d'un bon sens de l'odorat travaillent d'ailleurs toujours beaucoup à l'odeur. C'est la première chose qui frappe en ouvrant une boîte de Petri, le dispositif classique pour cultiver des bactéries en laboratoire. C'est même un jeu non dénué d'humour entre bactériologues de repérer les bactéries à odeur agréable de carambar comme *Streptococcus anginosus*, *S. intermedius* et *S. constellatus*; *Pseudomonas aeruginosa*, qui sent la fleur de seringat, proche du jasmin; *Clostridioides difficile*, qui sent le crottin de cheval (par libération de crésol) ou encore *Staphylococcus lugdunensis*, qui sent la rosette de Lyon. Le problème se corse quand on change de laboratoire car ces référentiels sont très subjectifs: ainsi, d'un laboratoire à un autre, *Haemophilus influenzae* sent le sous-bois... ou la souris.

Il n'en reste pas moins que chaque bactérie pathogène produit une odeur spécifique et que des maladies, infectieuses ou non, peuvent être diagnostiquées sur cette base. Certains médecins s'aident d'ailleurs de leur odorat pour établir leur diagnostic: une haleine aux relents d'œuf pourri peut ainsi trahir un diabète ou une insuffisance

hépatique. Les vaginoses bactériennes dues à la prolifération notamment de *Gardnerella vaginalis*, productrice d'ammoniac, s'accompagnent d'une odeur de poisson pourri. De même, des personnels soignants expérimentés savent reconnaître la colite récidivante à *Clostridioides difficile* en sentant les selles du patient, ou les plaies infectées par *Pseudomonas aeruginosa* à leur odeur fruitée proche de la pomme pourrie. D'autres sont même sensibles à l'odeur de la maladie de Parkinson.

La détection olfactive de bactéries pathogènes est en fait pratiquée depuis l'Antiquité.

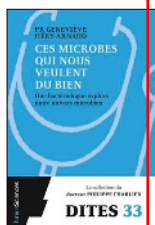
Dès cette époque, Hippocrate avait mis en évidence la modification des odeurs corporelles par les maladies et préconisait aux médecins de brûler les crachats de leurs patients et de sentir la fumée pour diagnostiquer la tuberculose. Aujourd'hui encore, on diagnostique cette maladie, qui a encore tué 1,4 million de personnes dans le monde en 2019, à partir de l'analyse de crachats. C'est un prélèvement facilement accessible, mais qui ne donne qu'un reflet partiel du microbiote pulmonaire. Il faut parfois explorer des zones profondes et recourir à des méthodes invasives comme la bronchoscopie ou le lavage bronchoalvéolaire pour avoir un diagnostic fiable.

EXPLOITER L'ODORAT DES ANIMAUX

De nombreuses expériences ont été menées, notamment avec des chiens renifleurs, pour tirer parti de leur odorat 100000 fois plus sensible que celui des humains. On utilise déjà leurs performances impressionnantes pour détecter les personnes, les armes, les bombes, les stupéfiants ou la nourriture. Les chiens dressés figurent aussi en bonne place dans les nombreuses expériences menées pour diagnostiquer des maladies infectieuses. Ils sont par exemple capables d'aider au diagnostic microbiologique des infections intestinales à *Clostridioides difficile*, des infections urinaires à *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* ou *Enterococcus faecalis*, ou encore de dépister des cancers du sein.

Ainsi, en 2017, Isabelle Fromantin, à l'Institut Curie, à Paris, et ses collègues ont entraîné deux chiens à reconnaître un cancer du sein parmi quatre échantillons de sueur. Puis ils ont testé les chiens sur 130 échantillons de sueur: les chiens ont détecté 90,3% des cas de cancer du sein. L'équipe a lancé en 2020 la deuxième phase du projet, nommé Kdog: une étude clinique de trois ans sur 450 volontaires présentant une mammographie anormale.

Autre exemple: une étude menée par Jane Davies, à l'Imperial College de Londres, publiée en 2019, a montré que deux à quatre chiens entraînés à reconnaître l'odeur de la



À LIRE

Geneviève Héry-Arnaud
a récemment publié
**Ces microbes qui nous
veulent du bien,**
Humensciences, 2021

Des chiens ont détecté des patients atteints de Covid-19 avec une sensibilité de 86 %

bactérie *Pseudomonas aeruginosa*, responsable d'infection pulmonaire dans la mucoviscidose, ont ensuite été capables de la distinguer d'autres bactéries pathogènes, avec plus ou moins d'acuité selon le cocktail utilisé et sa dilution. Un résultat encourageant tant il est crucial de détecter le plus tôt possible cette bactérie dans les poumons des malades, car elle s'accompagne d'une forte dégradation de leur fonction respiratoire.

Par ailleurs, en 2020, Dominique Grandjean, à l'école nationale vétérinaire d'Alfort, et ses collègues ont montré que des chiens entraînés sont aussi capables de détecter des individus atteints de Covid-19 à partir d'échantillons de sueur prélevée sous les aisselles, avec un taux de réussite de 76 à 100%. Ce très intéressant résultat a été reproduit et confirmé dans une étude réalisée en Iran sous la houlette de Mahdi Shiri, de l'université de sciences médicales Aja, à Téhéran. Trois chiens entraînés à reconnaître des patients atteints de Covid-19 à partir d'habits et de masques ont obtenu une sensibilité de 86% (ils ont détecté 86% des personnes positives au Covid-19) et une spécificité de 92,9% (ils ont reconnu comme négatives 92,9% des personnes saines), ce qui dépasse largement les performances de certains tests antigéniques. Précisons que, dans le cas de ces infections virales, les virus n'ayant pas de métabolisme propre donc pas d'odeur, ce sont les composés organiques volatils produits par le déséquilibre du microbiote, caractéristiques de l'infection, qui sont analysés (c'est aussi le cas dans les maladies non infectieuses comme le cancer du sein ou la maladie de Parkinson).

Plus étonnantes, les expériences menées en Tanzanie depuis 2009 avec des rats géants africains (*Cricetomys gambianus*) dressés à sentir des échantillons de crachats et à y détecter la présence de *Mycobacterium tuberculosis*. Déployées à grande échelle, ces expériences ont permis d'augmenter la détection de la tuberculose active, surtout chez les enfants.

Si les rats géants impressionnent par leur « cadence d'analyse » (cinq échantillons par

minute), ils sont cependant moins sensibles et moins spécifiques que les outils de la microbiologie moderne (PCR). Mais ces derniers restent peu accessibles dans des pays à faible niveau économique malgré les efforts déployés par l'association de Bill et Melinda Gates. Ainsi, dans certains contextes spécifiques, les animaux peuvent apporter des solutions acceptables et à bas coût. Mais, de manière générale, on imagine difficilement utiliser ces capacités olfactives à grande échelle. En revanche, identifier les composés organiques volatils que ces animaux reniflent détectent dans les selles, l'urine, les crachats, sur la peau ou dans l'air expiré permettrait de concevoir des tests olfactifs rapides, non invasifs et abordables.

De fait, beaucoup d'espoirs résident dans les possibilités de diagnostic bactériologique automatisé et non invasif fondé sur l'analyse des composés organiques volatils de l'air pulmonaire exhalé, notamment pour détecter la tuberculose et la mucoviscidose. Cette maladie génétique affecte environ 1 nouveau-né sur 4000 dans les populations occidentales et concerne plus de 7000 malades en France. Elle touche principalement le pancréas, les intestins et les poumons. La surveillance, notamment sur le plan bactériologique, de la maladie pulmonaire est un élément clé qui conditionne le pronostic vital. L'accumulation d'un mucus bronchique mal évacué favorise l'installation de bactéries pathogènes comme *Haemophilus influenzae*, *Staphylococcus aureus* ou la redoutable *Pseudomonas aeruginosa* déjà mentionnée.

Nous avons évoqué la détection de cette bactérie par des chiens spécifiquement dressés. Une autre solution consiste à identifier, dans l'air exhalé, un de ses constituants, une molécule au doux parfum de jasmin, la 2-aminoacétophénone (C_8H_9NO), grâce à des techniques couplant la chromatographie en phase gazeuse à la spectrométrie de masse. Mais en dépit de la miniaturisation des équipements, il reste difficile de déplacer ces moyens d'analyse auprès des patients.

MISER SUR LES NEZ ÉLECTRONIQUES

La solution pourrait venir de « nez électroniques », ces réseaux de capteurs moléculaires, développés depuis une vingtaine d'années (voir l'article page 34). Bien adaptés à l'analyse de l'air expiré et aisément transportables, ces dispositifs ont pour principe général d'imiter le système nerveux olfactif, de la fixation d'une molécule à un récepteur (le capteur) au signal qui en résulte et est transmis au cerveau (le détecteur). Chaque capteur reconnaît une molécule, et un réseau de capteurs peut reconnaître un panel prédéfini de molécules, le plus spécifique possible de l'espèce bactérienne

BIBLIOGRAPHIE

I. Mogilnicka et al., **Microbiota and malodor – Etiology and management**, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21(8), article 2886, 2020.

E. Cambau et M. Poljak, **Sniffing animals as a diagnostic tool in infectious diseases**, *Clin. Microbiol. Infect.*, vol. 26(4), pp. 431-435, 2020.

J. C. Licht et H. Graserann, **Potential of the electronic nose for the detection of respiratory diseases with and without infection**, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21(24), article 9416, 2020.

A.-L. Byrd et al., **The human skin microbiome**, *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 16(3), pp. 143-155, 2018.

C. Callewaert et al., **Towards a bacterial treatment for armpit malodour**, *Exp. Dermatol.*, vol. 26(5), pp. 388-391, 2017.

N. O. Verhulst et al., **Composition of human skin microbiota affects attractiveness to malaria mosquitoes**, *Plos One*, vol. 6(12), article e28991, 2011.

recherchée. C'est un examen diagnostique simple, peu coûteux, répétable à volonté et non invasif: le patient souffle sur le réseau de capteurs fixé dans une enceinte fermée. Concrètement, en l'état actuel des connaissances, dans le cas de la tuberculose, on recherche *M. tuberculosis* en ciblant la détection d'un panel constitué au moins de cyclohexane, de naphthalène et de dérivés du benzène. Dans le cas de la mucoviscidose, pour détecter *P. aeruginosa*, on recherche une association de 2-aminoacétophénone, de butanone-2, de diméthyltrisulfure et de cyanure d'hydrogène.

Les expérimentations sont déjà nombreuses, dans diverses pathologies comme la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO, une forme grave de bronchite), les infections pulmonaires, la mucoviscidose, les cancers pulmonaires ou le cancer du sein. En voici trois exemples parmi tant d'autres:

en 2018, Alex Pizzini, de l'université d'Innsbruck, en Autriche, et ses collègues ont évalué avec succès l'état de patients atteints de BPCO; en 2017, une équipe de chercheurs paraguayens et néerlandais a montré, sur 110 patients et personnes saines, qu'il était possible de diagnostiquer la tuberculose avec des taux de réussite prometteurs (une sensibilité de 88% et une spécificité de 92%), une information importante pour isoler des malades dans des populations indigènes vulnérables; également à partir de l'air exhalé, en 2020, une équipe mexicaine a diagnostiqué avec 98% de succès un panel de 443 femmes atteintes ou non d'un cancer du sein. Ainsi s'ouvre l'ère de la volatolomique, l'analyse de l'ensemble des composés organiques volatils (le volatolome) d'un échantillon, à l'instar de la génomique pour le génome ou de la microbiomique pour les microorganismes. ■

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

PORTONS LA VOIX DE LA NATURE

Partagez notre engagement !

Écoutez **Pour que nature vive**, des podcasts incarnés par des scientifiques pour **comprendre le vivant**.
18 épisodes en ligne sur le site du Muséum et sur les plateformes d'écoute.

Lisez les **Manifestes du Muséum**, une collection d'ouvrages qui offrent un **éclairage scientifique** sur des **sujets d'actualité**.
4 ouvrages déjà disponibles en librairie.

Participez aux **Tribunes du Muséum**, le rendez-vous qui remet **la science** au cœur du **débat politique et social**.
2 rencontres par an, captations vidéos sur le site du Muséum et sur Youtube.

Plus d'informations sur **mnhn.fr**

POUR LA SCIENCE

Du nez biologique

Au fil de l'évolution, les systèmes olfactifs des animaux ont résolu nombre de problèmes liés à l'analyse des molécules odorantes. Comment s'en inspirer pour développer des systèmes olfactifs artificiels plus performants?



au nez électronique

L'ESSENTIEL

> L'odorat est un sens bien plus complexe que la vision, dont on commence seulement à comprendre les mécanismes.

> L'étude du génome de milliers d'individus révèle notamment que deux personnes sentant une même molécule ne perçoivent pas toujours la même odeur.

> L'odorat d'une personne varie aussi dans le temps, modelé au fil des apprentissages au sein du cortex piriforme,

une région cérébrale où les informations olfactives perçues se réorganisent

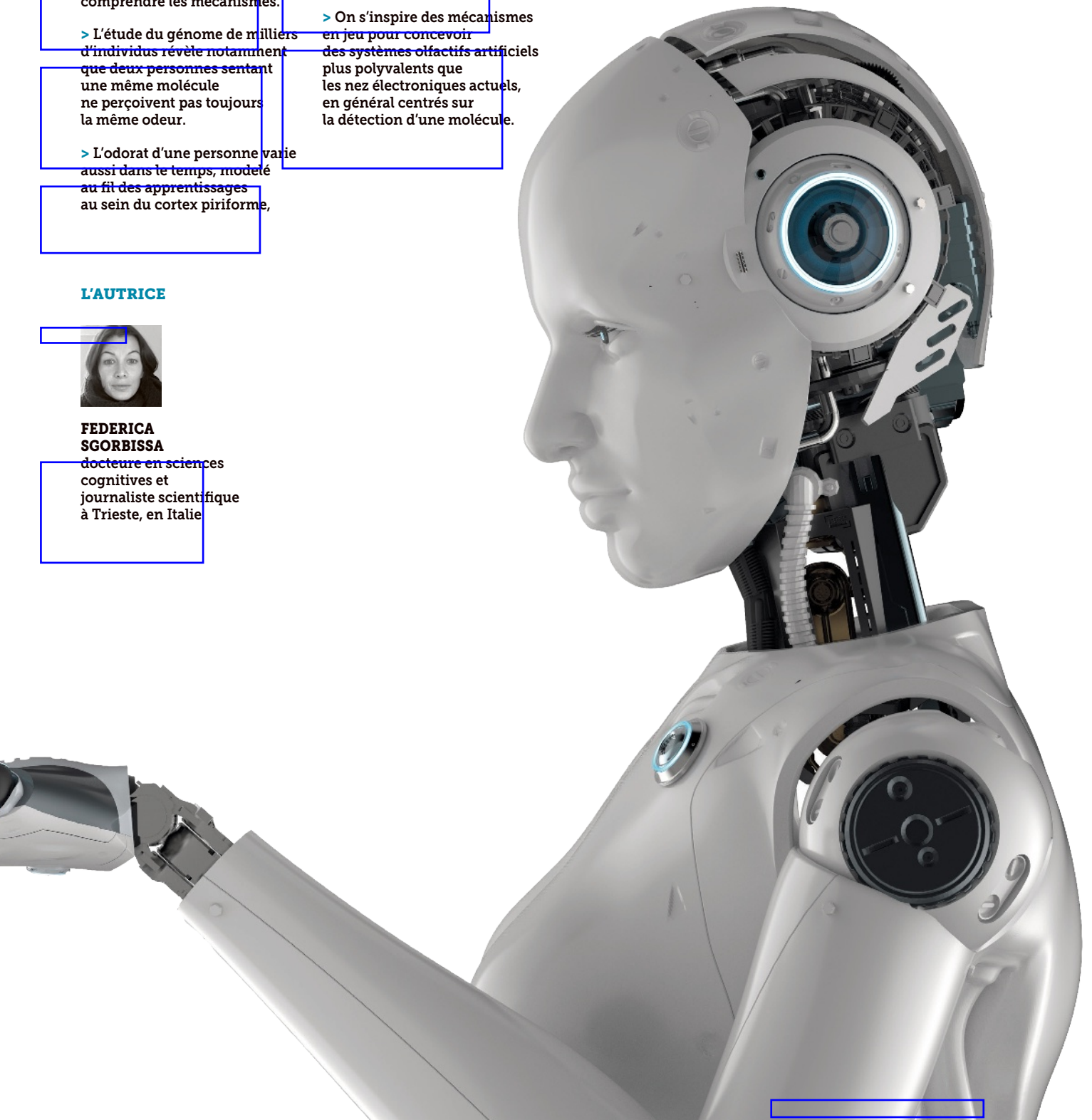
> On s'inspire des mécanismes en jeu pour concevoir des systèmes olfactifs artificiels plus polyvalents que les nez électroniques actuels, en général centrés sur la détection d'une molécule.

L'AUTRICE



FEDERICA SGORBISSA

docteure en sciences cognitives et journaliste scientifique à Trieste, en Italie



Chaque fois que vous ouvrez le pot de sel aromatique, le parfum intense de menthe, sarriette, sauge et mélisse qui s'échappe vous replonge dans cette randonnée au cours de laquelle vous avez cueilli ces herbes. Les odeurs ont ce pouvoir presque magique : elles évoquent des émotions et des souvenirs de manière bien plus vive que les images ou les sons. Pourtant, l'odorat est un sens sous-estimé.

« Lorsque je demande aux gens de quel sens ils pourraient se passer, plus de la moitié répondent : l'odorat ! », confie Valentina Parma, chercheuse à l'université Temple, à Philadelphie, aux États-Unis. Valentina Parma étudie les liens entre ce sens et la sphère émotionnelle. « Les personnes qui perdent l'odorat voient souvent leur qualité de vie diminuer : les aliments ne sont plus agréables, l'odeur des proches perd sa valeur et le risque d'empoisonnement augmente, de même que celui de ne pas percevoir une fuite de gaz », explique-t-elle.

Cela peut surprendre, mais nous connaissons mal les processus cérébraux qui régulent ce sens, et le retard en matière d'intelligence artificielle dans le domaine est significatif : il n'existe toujours pas de dispositif olfactif comparable à ceux désormais courants dans d'autres domaines sensoriels, comme les systèmes de vision artificielle ou de reconnaissance vocale de nos téléphones et nos ordinateurs. Mais ces dernières années, des découvertes ont commencé à changer la donne.

Peu d'entre nous connaissent le marché des arômes alimentaires, un secteur industriel qui a un impact important sur la consommation. Des multinationales telles que Givaudan et Firmenich (dont le chiffre d'affaires est de

plusieurs milliards de dollars par an) comptent parmi les leaders mondiaux de la production de parfums utilisés dans l'industrie alimentaire et ailleurs. C'est à ce secteur industriel que l'on doit une forte accélération de la recherche scientifique, même si, en réalité, l'odorat a été l'un des premiers sens étudiés par les neuroscientifiques.

« La neurophysiologie est plus ou moins née avec l'étude de l'odorat », explique Giuliano Iurilli, chercheur au Centre des neurosciences et des systèmes cognitifs de l'Institut italien de technologie, à Rovereto. Dès le début du ^{xx}e siècle, le Britannique Edgar Adrian, Prix Nobel de physiologie ou médecine en 1932, a mené d'importantes recherches sur ce sens. « Toutefois, ces études se sont vite arrêtées, précise Giuliano Iurilli. La raison est simple : c'est un sens extrêmement compliqué. Bien plus que la vision. »

Malgré ces difficultés, après la Seconde Guerre mondiale, développer des instruments pour l'industrie des parfums est devenu une nécessité. Il fallait notamment comprendre quelle est l'odeur d'une molécule dont on ne connaît que la structure chimique. La science n'a pas encore répondu à cette question. Mais elle a avancé sur la description de l'olfaction.

DES MILLIONS DE MILLIARDS D'ODEURS DÉCODEES

« Lorsque nous sentons quelque chose, nous respirons des molécules volatiles, explique Valentina Parma. Ces molécules stimulent les neurones sensoriels disposés aléatoirement sur l'épithélium olfactif, dans la partie supérieure du nez. Cet organe abrite ainsi des millions de ces cellules, chacune étant associée à un type de récepteur olfactif. »

Imaginez que ces récepteurs soient des briques de construction avec des rainures différentes : chacun ne se lie qu'à certaines molécules volatiles et ne code que certaines odeurs. L'olfaction est fondée sur un système combinatoire : au lieu de dédier un récepteur olfactif à une odeur, c'est la combinaison des activations de plusieurs récepteurs qui détermine ce qui sera perçu. Ainsi, avec « seulement » 400 types différents de récepteurs, nous décodons des millions de milliards d'odeurs. La découverte de ce mécanisme, au début des années 1990, a valu aux biologistes américains Linda Buck et Richard Axel le prix Nobel de physiologie ou médecine en 2004.

Le voyage du signal nerveux olfactif ne s'arrête pas là. Les axones des neurones sensoriels – l'axone est le prolongement qui part du corps du neurone et s'étend vers d'autres cellules – traversent un os perforé de nombreux trous, la lame criblée de l'ethmoïde, et atteignent les bulbes olfactifs dans le cerveau, deux protubérances situées à la base du lobe

L'ODORAT, UN SENS À PART

Un parfum est comme une machine à remonter le temps : il peut nous ramener au cœur d'un souvenir. « L'olfaction est le seul sens qui ne nécessite pas l'activation du thalamus, une structure responsable de la perception sensorielle consciente, avant la transmission de l'information au cortex cérébral, explique Valentina Parma, de l'université Temple, à Philadelphie. Au contraire, le système olfactif est lié à des structures du système limbique comme l'amygdale [qui traite de façon inconsciente l'émotion associée aux odeurs] et l'hippocampe [qui intervient dans leur mémorisation]. C'est sans doute pour cela que les odeurs nous transportent vers un souvenir passé si vif qu'il semble réel. »

L'odorat est par ailleurs un système assez isolé pour des raisons anatomiques. Notamment, le système olfactif ne semble communiquer directement avec aucune région cérébrale importante pour la commande motrice et la navigation spatiale. « Cela explique probablement pourquoi nous ne sommes pas capables de bien localiser ou quantifier les odeurs, ni même de les décrire, explique Giuliano Iurilli, de l'Institut italien de technologie, à Rovereto : il n'y a pas de communication directe avec les aires du langage et les étapes pour atteindre les centres du langage sont donc beaucoup plus nombreuses. »



frontal. Dans les bulbes, des structures nommées «glomérules» regroupent les informations provenant de différents neurones olfactifs et leur donnent une représentation spatiale spécifique – une carte dite «chimique»: des régions différentes du bulbe s'activent selon la molécule sentie.

Chaque odeur active un groupe de glomérules différents et, en fonction du nombre et de la nature des glomérules activés, il est possible de déterminer de quelle odeur il s'agit. De là, l'information olfactive arrive dans le cortex piriforme, une petite région cérébrale située dans le lobe temporal. Dans cette région, la carte olfactive présente dans les bulbes disparaît – une étape cruciale, nous le verrons.

Le fonctionnement du cortex piriforme est complexe. Des interconnexions étendues le relient non seulement au bulbe olfactif, mais aussi à des structures olfactives secondaires telles que l'amygdale, qui traite, sans que l'on en ait conscience, l'émotion associée aux odeurs, l'hippocampe, qui permet la formation de souvenirs olfactifs, et le cortex orbitofrontal, qui traite de façon consciente la valeur de chaque odeur.

«L'idée générale, conclut Valentina Parma, est que les transformations spatiales qui se produisent lors du passage des récepteurs aux aires corticales, c'est-à-dire lors du passage des cartes ordonnées des bulbes olfactifs au brassage apparemment aléatoire du cortex

piriforme, offrent la possibilité d'encoder à la fois des odeurs que nous reconnaissons de manière innée, sans en avoir fait l'expérience, à l'aide de circuits neuronaux stéréotypés, et des odeurs que nous reconnaissons par l'expérience et qui nécessitent une flexibilité fondée sur l'apprentissage.»

DE L'INNÉ ET DE LA FLEXIBILITÉ, MAIS PAS TROP

«Pour certaines odeurs, la flexibilité doit être faible, ajoute Giuliano Iurilli. Surtout chez des animaux chassés par des prédateurs.» Une souris, par exemple, ne peut avoir une représentation trop variable des odeurs du renard ou du loup. Cette représentation doit au contraire être stable et activer rapidement des circuits moteurs de défense. Trop de flexibilité entraîne un retard dans la réponse, une incertitude, ce qui, sur le plan évolutif, est suicidaire.

Cependant, même si les processus stéréotypés ont une forte base innée, l'effet de l'expérience n'est pas exclu. Dans le système nerveux, si des fonctions innées se manifestent toujours, d'autres, également innées, nécessitent l'intervention de l'environnement pour se développer.

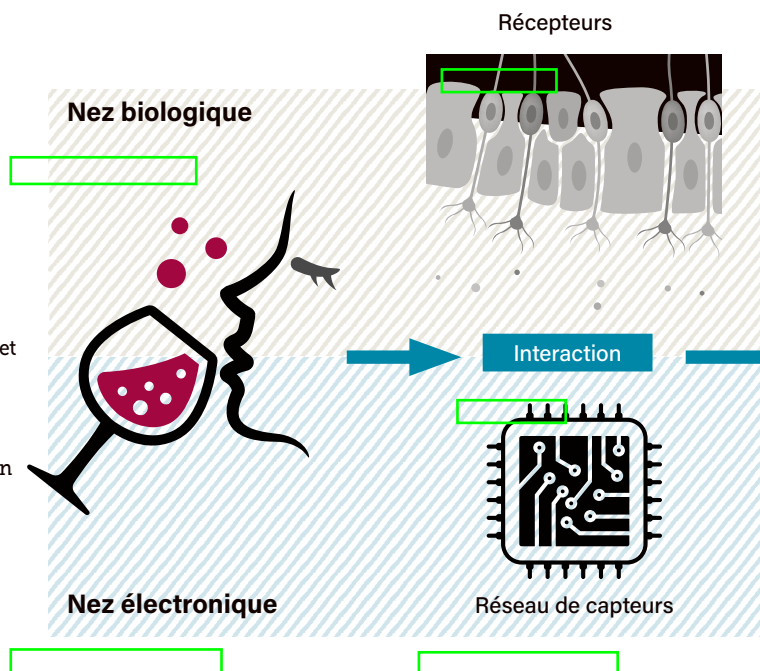
C'est le cas dans la vision tridimensionnelle binoculaire: dans le cerveau humain adulte, des structures nommées «colonnes de dominance oculaire» perçoivent les légères différences entre les images reçues par chaque œil, ce qui permet au cerveau de «calculer» la distance de

Inaugurée en 1968, l'usine laboratoire d'Eze, près de Nice, est l'une des trois usines de la parfumerie Fragonard, fondée en 1926 à Grasse. L'industrie des parfums a donné une forte impulsion à la recherche scientifique dans le domaine de l'olfaction.

NEZ BIOLOGIQUE
VERSUS NEZ ÉLECTRONIQUE

Dans les systèmes biologiques, l'identification d'une odeur commence par la liaison des molécules volatiles à des récepteurs spécifiques nichés dans la membrane de neurones olfactifs, eux-mêmes situés dans les cavités nasales. Les humains comptent environ 400 types de récepteurs olfactifs. En progressant vers les régions cérébrales plus centrales, les signaux issus de l'activation de ces récepteurs se combinent, ce qui nous permet de percevoir de nombreuses odeurs différentes (au moins 10 000, voire plus de 1 000 milliards selon certaines estimations).

Dans les systèmes artificiels, le nombre d'odeurs perceptibles est limité par le nombre de types de capteurs chimiques qui détectent les substances volatiles. Un processeur électronique analyse l'activation des capteurs selon une méthode plus ou moins d'inspiration biologique. En général, l'industrie préfère une approche d'ingénierie, moins flexible mais plus sûre, pour détecter des substances particulières. Le résultat est alors comparé à une banque de données pour rechercher des similitudes avec des odeurs connues. Contrairement aux nez biologiques, la plupart des nez artificiels sont incapables d'apprendre à reconnaître de nouvelles odeurs.



l'objet. Ces structures sont innées – les informations sont contenues dans notre génome –, mais elles ne se développent pas toujours. Une période de cécité immédiatement après la naissance, même temporaire, empêche leur formation. Par exemple, il suffit de bander les yeux de chats, une autre espèce présentant des colonnes binoculaires, durant les premiers jours pour provoquer une cécité permanente à la stéréoscopie.

Les aptitudes olfactives innées seraient de ce type. «Même les structures cérébrales importantes pour les comportements innés conservent une certaine plasticité. D'un point de vue énergétique, c'est plus économique, commente Giuliano Iurilli. À quoi servent des neurones représentant le renard si l'on n'en rencontre jamais?»

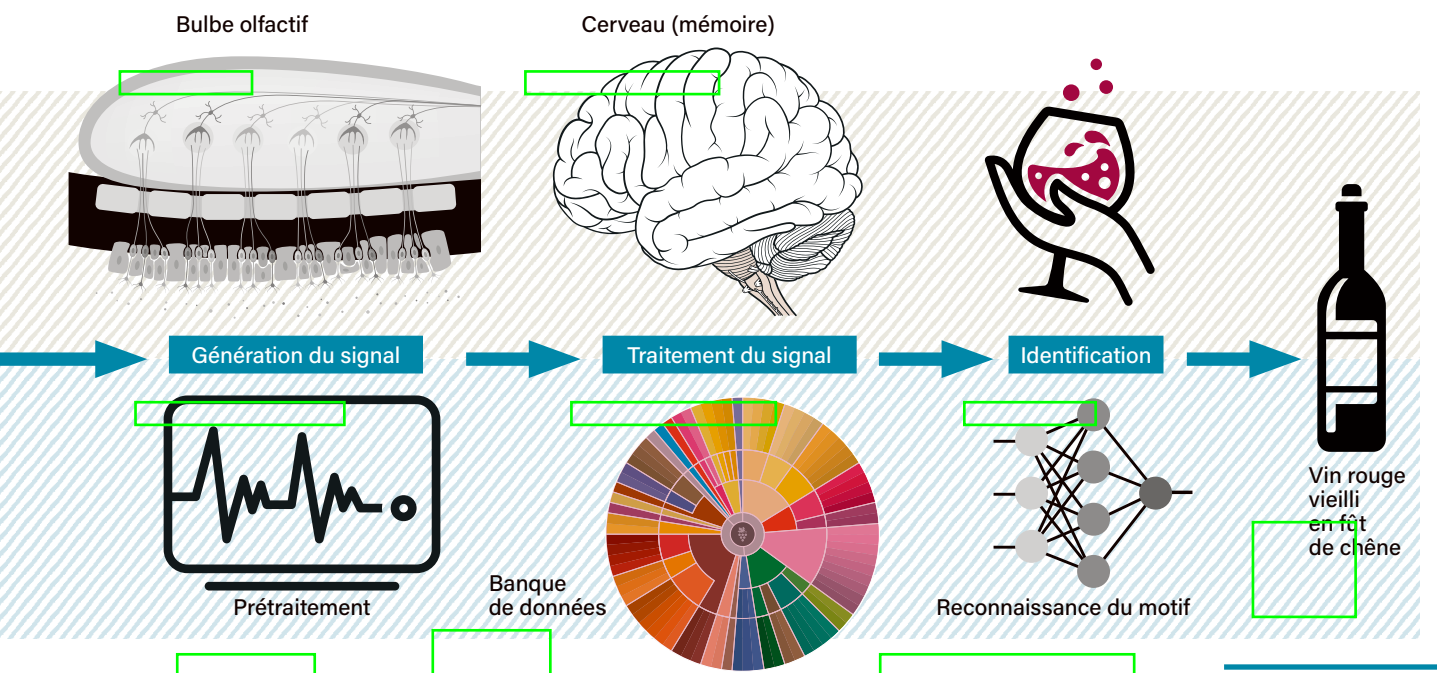
Selon lui, cela explique aussi la différence de vitesse d'apprentissage observée entre les réseaux de neurones artificiels et biologiques. «Aujourd'hui, avec les réseaux de neurones profonds, on fait un peu de tout: conduite automatique, reconnaissance vocale, etc. Mais un réseau artificiel nécessite un entraînement avec des millions d'exemples, alors que les cerveaux biologiques partent de quelque chose d'inné. S'ils en ont besoin, ils l'améliorent, sinon, ils ne l'exploitent pas, ce qui évite de consommer de l'énergie inutilement. Chaque système biologique part d'une base innée et ajoute ensuite de la flexibilité.»

UNE VARIABILITÉ
D'UN INDIVIDU À L'AUTRE

Revenons aux récepteurs olfactifs. Dans la membrane des cellules sensorielles sont fichées des protéines – chacune correspondant à un gène – qui se fixent sélectivement aux

molécules odorantes. Chez l'humain, plus de 900 gènes codent de telles protéines, dont, étonnamment, environ 500 sont des «pseudo-gènes», qui ne fonctionnent plus. «D'un point de vue évolutif, les gènes olfactifs se sont dupliqués, triplés, quadruplés pour former des grappes dans les chromosomes et ce processus évolutif est probablement encore actif», explique Paolo Gasparini, qui dirige le département de génétique médicale de l'institut pédiatrique Burlo Garofolo, à Trieste, en Italie, et qui a mené de nombreuses recherches sur les bases génétiques du goût et de l'odorat. «Aujourd'hui, nous n'utilisons plus notre odorat pour la reproduction ou pour identifier les proies et les prédateurs, des fonctions importantes dans notre passé évolutif. De nombreux gènes sont donc tombés en désuétude et ne conduisent au développement d'aucun type de récepteur.»

Un autre phénomène, observé récemment, a pu intervenir. «Grâce aux techniques de génomique, le génome de centaines de milliers de personnes dans le monde a été analysé, indique Paolo Gasparini. À Trieste, nous avons séquencé celui de plusieurs milliers d'individus. Les gènes les plus sujets à l'inactivation génique, c'est-à-dire à des mutations touchant les deux copies d'un même gène (ses deux allèles) chez un individu et rendant ce gène inactif, sont essentiellement de deux catégories: ceux qui codent les récepteurs olfactifs et ceux qui codent les kératines, des protéines fibreuses qui constituent les ongles, les cheveux et les poils. C'est une preuve supplémentaire que nous pouvons vivre avec un grand nombre de gènes olfactifs non fonctionnels.» La seule conséquence de ces invalidations géniques est la perte sélective d'une odeur, sans incidence sur la santé.



De tels phénomènes entraînent une variabilité entre les individus d'une même espèce. Certaines études suggèrent même que deux personnes sont susceptibles de percevoir différemment près d'une odeur sur trois. « Un exemple est emblématique, explique Valentina Parma. On perçoit l'androstadiénone, une hormone dérivée de la testostérone, grâce à un récepteur spécifique. Or on a répertorié trois variants alléliques du gène qui code ce récepteur. Selon le variant, on perçoit une forte odeur de sueur ou d'urine, une odeur douce et agréable, presque florale, ou rien du tout. Difficile de trouver un équivalent visuel! »

LE RÔLE CLÉ DU CORTEX PIRIFORME

L'odorat d'une personne varie aussi dans le temps. Ce fait, déjà décrit dans la littérature scientifique, est à nouveau apparu dans une étude menée en 2020 chez la souris par Giuliano Iurilli et Stefano Panzeri, de l'Institut italien de technologie, à Rovereto, et des collègues. L'objectif était de comprendre la transformation spatiale, c'est-à-dire le passage de la carte ordonnée des glomérules au chaos du cortex olfactif. « Dans le cortex piriforme, l'organisation chimique disparaît », explique Stefano Panzeri.

« Pour comprendre ce qui se passe, explique Giuliano Iurilli, imaginons les photos de deux personnes d'âge similaire aux cheveux courts et remanions aléatoirement tous les pixels de chaque photo. À ce stade, on peut penser que toutes les informations ont été perdues et que la similitude entre les deux photos n'est plus traçable. Pourtant, si on les compare avec la photo d'une personne plus âgée aux cheveux longs, elle aussi remaniée, on observe qu'il est

possible, malgré tout, de détecter que la distance entre la troisième et chacune des deux autres est plus grande que la distance entre ces dernières. » Le chaos du cortex piriforme n'est qu'apparent : grâce à ses connexions internes, non seulement il maintient l'information, mais il la réorganise et l'enrichit.

Et l'encodage de ces informations ne dépend pas que de la localisation des neurones : « Nous avons observé que dans le cortex piriforme, la séquence temporelle de l'expérience joue un rôle clé. Chez les souris familiarisées pendant quelques jours avec une séquence de deux odeurs chimiquement différentes, le cortex piriforme développait des représentations plus semblables des deux odeurs que chez celles qui n'avaient pas eu de période de familiarisation », explique Stefano Panzeri.

« On peut voir les catégorisations dans le bulbe comme des représentations proches des détails chimiques de l'odeur. Dans le cortex, en revanche, on se rapproche de la signification perceptive », conclut-il. Par exemple, nous regroupons sous le terme « agrumes » les odeurs d'orange et de citron, qui ont des structures chimiques différentes. Ce type d'association se produirait dans le cortex piriforme sur la base de l'expérience personnelle.

DES NEZ ARTIFICIELS BIOMIMÉTIQUES

De telles études permettent de découvrir de nouveaux détails sur les mécanismes en jeu dans le traitement des signaux olfactifs, dont on s'inspire ensuite pour développer des systèmes d'olfaction artificiels. Michael Schmucker, du groupe de bio-informatique de l'université du Hertfordshire, au Royaume-Uni, fait partie des quelques chercheurs dans le monde qui

SUR LA ROUTE DE LA SOIE

En 2010, avec d'autres chercheurs de l'institut pédiatrique Burlo Garofolo, à Trieste, Paolo Gasparini a réalisé une expédition sur la route de la Soie nommée Marco Polo 2010 (ci-dessous le marché de Samarcande, en Ouzbékistan, une étape de l'expédition), au cours de laquelle l'équipe a recueilli des informations sur les fonctions olfactives des populations le long de cette voie de communication historique entre l'est et l'ouest du continent eurasiatique.

Ces populations intéressent les généticiens, car elles vivent dans des conditions d'isolement génétique plus ou moins marqué. Grâce aux données récoltées, l'équipe a mis en évidence des différences dans les capacités olfactives

des populations rencontrées. « Nous avons constaté que les communautés vivant dans le Pamir avaient toutes une capacité olfactive réduite. Dans plus de 50 % des cas, les gens "se trompaient" sur l'odeur que nous avons utilisée dans les tests, explique Paolo Gasparini. En approfondissant, nous avons découvert que cette performance était probablement liée à un groupe spécifique de récepteurs olfactifs. Nous commençons donc à identifier des différences olfactives à l'échelle des populations, mais leur signification évolutive reste inconnue. »



développent des systèmes olfactifs biomimétiques ou, selon sa formulation, « d'olfaction neuromorphique ».

« Nous sommes encore loin de prédire l'odeur que produira une molécule inconnue à partir de ses caractéristiques chimiques », commente-t-il. Actuellement, les systèmes artificiels de l'industrie ont des fonctions très limitées par rapport aux nez biologiques. On utilise des nez artificiels dans l'industrie alimentaire ou pour la sécurité, afin de détecter la présence de gaz explosifs ou toxiques. Assez encombrantes, ces machines réalisent une chromatographie – une analyse chimique des substances présentes dans l'air. Elles ont par ailleurs au moins deux problèmes majeurs : elles sont lentes et très peu flexibles.

« Il est important d'améliorer ces machines en y incorporant les caractéristiques apprises des systèmes biologiques, poursuit Michael Schmuker. En s'inspirant des mécanismes

biologiques que nous étudions chez les mammifères, mais aussi chez les insectes, qui sont le produit de millions d'années d'évolution et ont donc déjà résolu de nombreux problèmes en matière d'olfaction, nous disposerions de systèmes rapides et capables de détecter un éventail plus large de molécules odorantes. »

Un domaine d'intérêt de Michael Schmuker est l'olfaction liée à un événement. « Un problème des nez artificiels est qu'il est difficile de localiser avec précision la source d'une substance odorante. Les machines classiques analysent les niveaux absolus de la molécule dans l'air, mais par cette approche il est difficile de localiser une source, comme une fuite de gaz. » En effet, les gaz ont tendance à stagner dans l'air ou, au contraire, à se dilater de manière turbulente et imprévisible.

« Notre nez fonctionne différemment : il est sensible aux variations de la concentration d'une molécule odorante plutôt qu'à ses

niveaux absolus.» Par exemple, lorsqu'on entre dans un bar, on est frappé par l'odeur du café, mais au bout d'un moment, on ne la sent plus. On y prête à nouveau attention si la concentration de la molécule odorante dans l'air augmente soudainement. «Nous développons des systèmes artificiels fondés sur la détection des changements d'odeur. Cela permet de repérer beaucoup plus vite à la fois la présence d'une molécule et sa source.»

imiter l'olfaction des insectes

«Le mot “neuromorphique” signifie “ayant la même forme que les neurones”, explique Michael Schmuker. Notre objectif est de décrire les principes calculatoires des systèmes olfactifs biologiques, puis de les transférer dans des algorithmes et des dispositifs.»

Pour l'atteindre, il faut d'abord des capteurs inspirés des récepteurs biologiques, mais ceux-ci n'existent pas encore. La plupart des capteurs chimiques actuels sont fondés sur la mesure de la résistance électrique d'un matériau sensible exposé à des molécules volatiles. Néanmoins, des récepteurs hybrides existent, constitués de capteurs biologiques – par exemple des cellules olfactives isolées et génétiquement modifiées, ou des cultures de tissu olfactif – reliés à un circuit électronique.

Plusieurs exemples de cette technologie hybride existent, et certains sont très récents. Ainsi, divers dispositifs munis de récepteurs de l'épithélium olfactif de chiens se sont révélés efficaces pour détecter une odeur de beurre due à la molécule de diacétyle dans les boissons alcoolisées. Un autre dispositif mis au point en 2019 à l'Institut de science industrielle et de technologie de Kanagawa, au Japon, utilise le système olfactif du moustique: le capteur est une protéine du moustique qui détecte l'odeur de l'octénol. Cette protéine est insérée dans une membrane cellulaire artificielle. Enfermé dans une chambre spéciale préservant le matériel biologique et introduit dans un robot, ce système, relié à des électrodes détectant et transmettant son activité, a réagi à la présence de la molécule dans l'air.

Ces dispositifs hybrides, cependant, ont souvent la même limite: leur partie biologique est généralement constituée de récepteurs d'un seul type, qui ne détectent qu'une classe très restreinte de molécules odorantes. Mais la technologie se développe et il est probable que, dans un avenir proche, elle devienne capable d'intégrer plusieurs types de récepteurs à la fois.

Bien sûr, disposer de récepteurs efficaces ne suffit pas pour atteindre l'olfaction neuromorphique. Ils ne sont que la première étape. En 2007, Michael Schmuker a décrit un système d'olfaction artificiel complet fondé sur

celui des insectes. Le modèle comporte trois étapes. La première imite les récepteurs biologiques et reproduit l'aspect combinatoire de l'analyse effectuée par l'épithélium olfactif. À ce stade, différents types de récepteurs sont accordés à différents groupes d'odeurs. L'activation combinée de ces récepteurs constitue l'entrée dans la deuxième étape. Ce stade s'inspire du lobe antennaire, l'organe de l'insecte qui correspond aux bulbes olfactifs des vertébrés. À cette étape, par le biais de connexions inhibitrices entre les cellules, les informations olfactives sont «canalisées» et renforcées, comme dans les glomérules. Une carte chimique se forme alors, où des glomérules proches se spécialisent pour des odeurs chimiquement similaires.

Dans la troisième étape, un algorithme d'apprentissage automatique est appliqué, c'est-à-dire un système informatique avancé capable d'apprendre par lui-même à catégoriser des stimuli. C'est l'étape qui imite ce qui se passe dans le cortex olfactif. Les performances du système, en cours d'amélioration, sont encore inférieures à celles du système biologique, mais elles sont comparables à celles des méthodes d'apprentissage automatique les plus répandues, comme les classificateurs dits «bayésiens».

des nez électroniques, pour quoi faire?

Les systèmes olfactifs biomimétiques sont donc encore loin d'être disponibles sur le marché. Mais les difficultés techniques ne sont pas le seul obstacle. Certains chercheurs se demandent si nous avons besoin d'appareils qui sentent comme nous. Giuliano Iurilli est sceptique: «Nous avons déjà des systèmes qui détectent les sources de contamination, d'intoxication et les explosifs potentiels.» La seule application vraiment nécessaire, selon lui, serait médicale: «Ils pourraient être utiles pour reconnaître une maladie à l'odeur. On utilise déjà des chiens, mais dresser et garder un chien dans un hôpital est coûteux et peu pratique.»

Michael Schmuker voit les choses différemment: «Une raison de développer des systèmes d'olfaction artificiels biomimétiques est de mieux comprendre les systèmes biologiques.» De plus, grâce aux enseignements des systèmes biologiques, il a bon espoir que les systèmes olfactifs artificiels bio-inspirés gagneront en vitesse et polyvalence et consommeront moins d'énergie. Ils pourraient être exploités en agriculture «pour vérifier la maturation des cultures, identifier leurs maladies et les attaques de parasites». Et, qui sait, atteindre le graal: servir de prothèses numériques contre les troubles olfactifs, à l'instar de ce qui se fait pour améliorer l'audition et la vision. Plus de la moitié de la population mondiale de plus de 65 ans est concernée. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Cocca *et al.*, **A bird's-eye view of Italian genomic variation through whole-genome sequencing**, *Eur. J. Hum. Genet.*, vol. 28, pp. 435-444, 2020.

S. L. Pashkovski *et al.*, **Structure and flexibility in cortical representations of odour space**, *Nature*, vol. 583, pp. 253-258, 2020.

N. Misawa *et al.*, **Construction of a biohybrid odorant sensor using biological olfactory receptors embedded into bilayer lipid membrane on a chip**, *ACS Sensors*, vol. 4 (3), pp. 711-716, 2019.

M. Schmuker et G. Schneider, **Processing and classification of chemical data inspired by insect olfaction**, *PNAS*, vol. 104(51), pp. 20285-20289, 2007.

La flexibilité du réseau au service de la transition écologique

L'arrivée croissante de productions électriques délocalisées et intermittentes modifie en profondeur la distribution de l'énergie. Pour s'adapter à ces nouvelles ressources et les exploiter au mieux, le réseau devient actif grâce à une supervision très fine de la consommation et de la production électrique. C'est l'avènement de la flexibilité.

Le réseau de distribution électrique bâti tout au long du xx^e siècle rappelle celui d'un réseau d'irrigation.

Les centrales électriques sont les sources d'une énergie qui se déverse d'abord via les lignes à haute tension, jusqu'aux 2935 postes sources répartis sur tout le territoire. Ensuite, elle ruisselle sur le réseau moyenne tension (HTA) vers des transformateurs qui la délivrent enfin aux particuliers via la basse tension (BT). Durant ce parcours, la tension du courant

passé de 400 000 à 230 volts. Tout comme l'eau s'écoule du point le plus élevé jusqu'à la mer, le courant électrique s'écoule toujours des centrales aux particuliers de manière passive.

Ou plutôt «s'écoulait». Depuis quelques années, tout change: désormais, l'électricité se met à «remonter le courant», en quelque sorte... «C'est une conséquence de la transition énergétique en marche, explique Hubert Dupin, chef du département Flexibilités à Enedis. Fin 2020, la puissance

totale du parc électrique d'origine renouvelable – hydroélectricité, éolien, solaire photovoltaïque et bioénergies confondus – s'élève à 56 GW, soit 42% de la puissance disponible en France. Les filières éolienne et solaire, amenées à se développer, comptant aujourd'hui respectivement pour 18 MW et 11 MW. Or, 87% de ces producteurs sont raccordés au réseau de distribution HTA et BT dont Enedis a la charge. Cela signifie concrètement que de plus en plus de zones passent de strictement consommatrices à consommatrices ET productrices d'électricité. C'est un changement complet de paradigme.»

CLÉS D'OPTIMISATION

En effet, cette inversion des flux d'énergie pose un certain nombre de problèmes. Notamment parce que la production d'énergie renouvelable se distingue de celle des centrales conventionnelles par son intermittence, et sa dépendance vis-à-vis de la météo.



Comment adapter le réseau afin d'accueillir cette production supplémentaire, tout en optimisant les investissements?

«Aujourd'hui, la réglementation nous impose de réagir en "monotone de puissance", détaille Hubert Dupin. Cela permet de calculer la puissance maximale que le producteur sur le réseau est capable d'injecter puis d'adapter les infrastructures environnantes: augmenter le dimensionnement des câbles, des transformateurs, afin de pouvoir absorber cette production toute l'année. Toutefois cela coûte cher, non seulement au producteur, qui doit payer son raccordement (le câble qui le relie au réseau), mais aussi à la collectivité, car certains des ouvrages devant être modifiés servent à tout le monde et le coût est alors reporté sur l'ensemble des clients. Cela en vaut-il la peine alors que cette production maximale ne sera peut-être atteinte qu'une heure par an? D'où l'idée d'utiliser nos outils de surveillance en temps réel du

réseau afin de développer des alternatives d'un meilleur rapport coût/efficacité pour la collectivité. C'est la finalité des flexibilités que nous mettons en place. »

COUP D'ENVOI DE L'INDUSTRIALISATION

Par exemple, l'Offre de Raccordement Alternative à puissance modulée (ORA) est particulièrement bien adaptée au caractère intermittent des productions EnR. «L'idée consiste à réfléchir en courbe

de charge qui correspond à la puissance produite ou consommée en fonction du temps, selon Jérôme Moiziard, ingénieur du département Flexibilités d'Enedis. Concrètement, en fonction de l'état du réseau, des prévisions météorologiques, de la consommation, nous allons anticiper, grâce à des méthodes stochastiques ou à base d'IA, les moments où l'apport d'un producteur EnR risque d'entraîner une surcharge du réseau, et lui demander de réduire sa production durant ces quelques heures.»

**Offrir des services
d'un meilleur rapport coût/efficacité
au bénéfice des collectivités.**

« LE CHARGÉ DE CONDUITE, ACTEUR CLÉ DES FLEXIBILITÉS »

La mise en musique des différentes flexibilités repose sur les Agences de Conduite, centres de supervision et de pilotage du réseau d'Enedis.

C'est de là qu'opère le chargé de conduite.

« Dans ce cadre, son rôle est de calculer et transmettre les limitations de production explique Benoît Bouzigon, chef de projet au département Conduite d'Enedis. L'opérateur va déterminer quelles sont les contraintes prévues, comme des anomalies en tension ou intensité, qui souvent viennent de travaux ou d'installations défectueuses sur le réseau. »

Pour cela, le chargé de conduite s'appuie sur un calculateur de contraintes. Autrement dit, un algorithme nourrit, avec des prévisions de production et de consommation, la topologie du réseau à l'instant T, ainsi que les modifications déjà prévues, comme des travaux. Ensuite, il fait un calcul de répartition de flux, pour estimer celui-ci en tout point du réseau, et déterminer ainsi les contraintes en intensité (si les intensités maximales d'un transformateur ou d'un départ électrique sont dépassées, par exemple), ou en tension.

Mais ce calcul de contraintes s'est grandement complexifié avec l'arrivée des énergies d'origine renouvelable. Auparavant, le distributeur observait l'état de son réseau lorsqu'il faisait très froid : si tout le monde allume son chauffage électrique en même temps, il est facile de repérer les endroits du réseau susceptibles d'être sollicités au-delà de leur capacité. « Aujourd'hui, avec une production intermittente, la contrainte risque d'arriver à tout moment, constate



mégawatts. Nous avons donc besoin d'outils de prévision afin d'anticiper les problèmes, mais aussi d'outils en temps réel pour détecter ceux que nous n'aurions pas vus en prévisionnel. »

Une fois la contrainte détectée, le chargé de conduite cherche son origine. Lorsque le réseau est complet, sans travaux, cela vient souvent d'un producteur d'EnR. « Nous regardons alors sa prévision de production, reprend Benoît Bouzigon. Si elle est supérieure à ce qui est garanti, nous lui demandons de la baisser. » L'objectif, bien entendu, est de minimiser l'ampleur de cette baisse, en intensité comme en durée. Car après tout, c'est de l'énergie renouvelable qui est perdue ! Il faut donc disposer d'algorithmes capables d'une prévision la plus précise possible de l'importance de la contrainte, et de sa durée. « Nous avons intégré ces algorithmes à l'outil de conduite, le logiciel qui fait tourner les pupitres opérateurs des chargés de conduite, détaille Benoît Bouzigon. Cela facilite son utilisation et permet d'avoir la topologie du réseau en temps réel.

C'est aussi un outil d'aide à la décision, qui va vérifier des paramètres que l'humain n'aurait pas le temps de contrôler. »

Le chargé de conduite valide et envoie la consigne de limitation aux producteurs. Ensuite, la situation est réexaminée toutes les trente minutes, et cette fois le logiciel décide seul si la limitation doit être maintenue. Si c'est le cas, l'opérateur n'a rien à faire, mais si la situation permet un retour à la normale, il en est informé et c'est lui qui décide de lever concrètement la limitation. Ces outils spécifiques, développés dans le cadre du démonstrateur Smart Grid Vendée, sont actuellement en test dans les trois expérimentations « Offre de Raccordement Alternative à puissance modulée » (ORA) sur tout le territoire. Ils devraient encore s'améliorer. « Nous sommes en train d'intégrer un optimiseur à notre outil de prévision des contraintes, conclut Benoît Bouzigon. Et donc de l'appliquer à nos problématiques. Pour cela, nous cherchons à mettre en équations le réseau et ses caractéristiques. Un type d'équations que l'optimiseur saura résoudre. »

Un coup de vent sur un champ d'éoliennes, un ciel qui se dégage au-dessus d'une centrale solaire, et vous passez en quelques instants d'une production faible à plusieurs mégawatts.

Benoît Bouzigon. Un coup de vent qui souffle sur une ferme d'éoliennes, un ciel qui se dégage brutalement au-dessus d'une centrale solaire et vous passez en quelques instants d'une production faible, voire nulle, à plusieurs

► Limiter l'injection d'énergie par un parc éolien ou un parc de panneaux solaires va ainsi soulager momentanément le réseau. Cela se traduit par un gain pour le producteur sur le coût et le délai de raccordement par rapport à un raccordement classique. Le producteur s'engage de son côté à respecter les limitations demandées par Enedis et dont le volume est inscrit dans son contrat de raccordement. L'offre ORA est en cours d'industrialisation après des expérimentations menées sur trois zones en France, la plus avancée se trouvant en Vendée où le parc éolien de Chauché et la centrale photovoltaïque de Talmont-Saint-Hilaire ont bénéficié d'un raccordement plus rapide et moins cher. L'offre sera prochainement disponible suite à la toute récente finalisation du cadre réglementaire dans le code de l'énergie français.

EXPÉRIMENTATIONS EN COURS

Mais d'autres flexibilités se mettent en place, en amont des producteurs, au niveau des postes sources, qui constituent l'interface entre le réseau de RTE et le réseau de distribution. «Ce sont des ouvrages mutualisés», explique Juliette Chatel, du département Raccordement des producteurs du pôle Transition énergétique d'Enedis. La problématique est différente, car les frais engagés pour redimensionner un poste source sont plus importants qu'au niveau des câbles HTA, et sur l'ensemble du réseau basse tension en général. Par ailleurs, un grand nombre de clients de tout type (pas seulement les producteurs d'EnR) sont concernés. L'idée, là encore, est d'optimiser l'existant et les investissements à venir. Grâce à la connaissance dynamique que nous avons de l'état du réseau, nous allons solliciter les acteurs pour qu'ils limitent de temps à autre leur production. C'est le projet Reflex.» Contrairement à l'offre ORA, que les clients auront le choix de souscrire ou non, la participation à Reflex sera automatique et permettra à l'ensemble des producteurs se raccordant sur un même poste

source d'en bénéficier. En revanche, ils seront indemnisés de la perte due au courant non vendu. «Ce qui est normal, puisque leurs efforts profitent à tous», remarque Juliette Chatel. «Nous estimons que cela permettra d'économiser 30 % des investissements, soit 300 millions d'euros d'investissements d'ici à 2035, chiffre Hubert Dupin. Certes, ces économies ont un coût puisqu'environ 0,06 % de la production sera effacée afin de ne pas surcharger le réseau. Mais la valeur de cette énergie non injectée ne représente que 50 millions d'euros. Le bénéfice est donc évident.» Tandis que le distributeur est en attente d'un feu vert législatif, Reflex s'apprête à être testé sur deux zones, l'une dans les Landes et l'autre dans la Somme.

Globalement, au-delà des offres ORA et Reflex, il s'agit bien d'optimiser les investissements au fil du temps pour faciliter la mise en œuvre de la transition énergétique. «Avec l'accroissement rapide du nombre de producteurs, les investissements deviendront inéluctables», analyse Julien Lucas, du département Flexibilités. Mais, en attendant, les flexibilités offrent une alternative intéressante aux redimensionnements des installations. Ainsi, avant de renforcer un réseau, nous étudions systématiquement la solution «avec investissement» et «sans investissement mais avec flexibilités» pour voir si l'optimisation constitue une alternative technico-économique viable.»

DES FLEXIBILITÉS POUR LA RÉSILIENCE DU RÉSEAU

La flexibilité concerne la production, mais également la consommation. C'est le cas d'usage «Résilience» par exemple, décrit par Sinziana Carloganu, également du département Flexibilités. «Imaginons un poste source dont nous anticipons qu'il faudra lui adjoindre un transformateur supplémentaire dans quelques années, car la région se développe rapidement. Pour l'instant, ce n'est pas nécessaire... Mais que faire si un transformateur tombe en panne? Dans ce cas, le risque est de voir les transformateurs

restants ne pas pouvoir prendre complètement le relais, entraînant la coupure de nombreux clients. Pour remédier à cela, la solution est de recourir à des services de flexibilité le temps de résoudre la panne: en demandant à certains sites raccordés aux transformateurs encore en fonctionnement (consommateurs ou producteurs) de moduler leur charge, il est possible d'améliorer la reprise en réalimentant plus de clients et/ou de sécuriser l'alimentation de la zone.»

Cette solution permet aussi d'effectuer des travaux de maintenance. Mais si l'appel à la flexibilité limite les coupures, comment les mettre en place concrètement? «Pour une situation donnée, nous faisons un appel d'offres auquel tout utilisateur du réseau ou acteur de marché peut répondre, et notamment les agrégateurs qui regroupent plusieurs producteurs, reprend Jérôme Moiziard. Mais il est par nature très localisé. Si nos besoins sont en Picardie, une offre des Bouches-du-Rhône ne nous apportera pas grand-chose! Nous risquons donc de nous trouver face à des appels infructueux.»

MULTIPLES APPELS D'OFFRES

D'où la nécessité de décrire au mieux ces appels d'offres, de manière à optimiser les chances d'avoir des réponses pertinentes. Un sujet complexe, car la nature des besoins du réseau varie grandement d'une région à une autre, en termes de produits recherchés et de valeur associée, intrinsèques à la configuration locale du réseau. Une diversité qui amène ainsi une grande variété de contractualisations possibles, et donc d'appels d'offres à imaginer.

En 2020, Enedis a publié une carte montrant cinq zones d'opportunité sur le territoire. «Nous avons sur chacune de ces zones une description détaillée des besoins, la puissance nécessaire, et pour combien de temps. Nous allons tester concrètement les appels d'offres que nous aurons mis au point, et la réponse du marché», explique Sinziana Carloganu. Sachant que ces flexibilités en action sur un territoire seront par nature provisoires. «En effet, conclut Jérôme Moiziard. Sur une zone donnée, les flexibilités dureront jusqu'au renforcement effectif du réseau. En revanche, le concept même de flexibilité, qui amène une transformation profonde des métiers au service des collectivités, a vocation à durer des années, se transposant d'une zone à l'autre, en fonction de leur développement.» ►

**Optimiser les investissements
au fil du temps pour mieux mettre
en œuvre la transition énergétique.**

L'ESSENTIEL

> La matière est distribuée dans l'espace selon des motifs liés aux conditions dans l'Univers primordial.

> Elle forme en particulier des sortes de coquilles dont le rayon sert d'étalon de distance à travers les âges. En y associant la mesure de la vitesse d'éloignement

des galaxies de ces coquilles, il est possible d'étudier l'évolution de l'expansion cosmique.

> Grâce aux projets BOSS et eBOSS, ces mesures conduisent à mieux comprendre la nature de l'énergie sombre, qui semble compatible avec une constante cosmologique non nulle.

LES AUTEURS



KYLE DAWSON
professeur de physique et d'astronomie à l'université de l'Utah, aux États-Unis, et responsable du projet eBOSS



WILL PERCIVAL
directeur du centre d'astrophysique de l'université de Waterloo et membre de l'institut Périètre, au Canada

La plus grande carte de l'Univers

Retracer 11 milliards d'années d'histoire cosmique !

Tel est le défi relevé par les astronomes qui ont mesuré la distance et la vitesse de millions de galaxies. En prime, avec ces données, ils lèvent une partie du voile sur l'une des grandes énigmes de l'Univers : l'énergie sombre.

La distribution des galaxies, telle que les astronomes la cartographient avec le programme SDSS, est marquée par l'empreinte des conditions de l'Univers primordial et des variations de l'expansion cosmique (ici en vue d'artiste).



Comme Douglas Adams l'écrivait dans *Le Guide du routard galactique*, « L'espace est immense. Vraiment immense. On n'a franchement pas idée de sa stupéfiante et considérablement gigantesque immensité. » Malgré l'ampleur de ce défi, à l'instar de nombreux astronomes, nous avons consacré notre carrière à explorer l'Univers aux plus grandes échelles possibles, afin d'en estimer la taille et d'étudier la physique qui régit son évolution.

En juillet 2020, avec nos collègues, nous avons produit la plus vaste carte du cosmos jamais réalisée à ce jour. Elle s'appuie sur les données du relevé du ciel SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) démarré il y a près de vingt ans. Elle comprend le voisinage de la Voie lactée, mais aussi les confins de l'espace et tout ce qui se trouve entre les deux. Cette carte tridimensionnelle contient les positions de quatre millions de galaxies réparties, telles des bornes kilométriques, sur plusieurs milliards d'années-lumière, remontant ainsi dans le temps jusqu'à certaines des époques les plus reculées de l'Univers.

La carte montre que les galaxies ne sont pas distribuées au hasard. Au contraire, elles se regroupent selon des motifs particuliers: de longs filaments et des murs bidimensionnels. Ces structures délimitent des régions relativement vides et sombres. Les scientifiques pensent que ces motifs sont apparus avant même la naissance des galaxies, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. En cartographiant le plus loin possible l'histoire cosmique, nous pouvons retracer la croissance de ces structures et en déduire certaines des lois fondamentales qui ont guidé leur évolution. Cet atlas des galaxies fournit des informations cruciales pour comprendre certaines des grandes énigmes de la physique, telles que la géométrie de l'Univers et la nature de l'énergie «sombre» (ou «noire») à l'origine de l'expansion accélérée de l'espace.

DES NOYAUX DE SURDENSITÉ ET DES COQUILLES

Le programme SDSS, dont la cinquième campagne vient tout juste de démarrer, utilise le télescope de la fondation Sloan installé sur l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique. Parmi les différents volets du programme, le projet BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*, ou Suivi spectroscopique des oscillations baryoniques) et son successeur eBOSS ont mesuré la distribution des galaxies afin d'étudier l'histoire de l'Univers. L'idée est d'utiliser une propriété dans la répartition spatiale des galaxies qui est issue du phénomène dit d'«oscillations acoustiques baryoniques» (BAO).

Pour comprendre de quoi il s'agit, il faut s'intéresser à l'évolution du cosmos au cours de ses 380 000 premières années, en commençant une fraction de seconde après le Big Bang. À cette époque, l'Univers a connu une période d'expansion rapide et extrême (l'inflation), durant laquelle il s'est développé si vite que les échelles typiques du monde subatomique ont enflé d'un facteur gigantesque (la taille de l'Univers a été multipliée par 10^{26}) en seulement 10^{-32} seconde. Ainsi, de minuscules fluctuations quantiques dans la distribution de l'énergie ont été amplifiées jusqu'à des dimensions macroscopiques (de l'ordre de la taille d'une balle de golf).

Ces fluctuations ont donné naissance à des régions présentant des surdensités d'énergie et de matière. Ces zones ont alors grandi en attirant toujours davantage de matière, laissant vides les autres. Au cours des 13,7 milliards d'années qui ont suivi, ces régions denses de matière ont évolué et formé les vastes structures hébergeant de nombreuses galaxies: les filaments, les murs et les amas que nous observons aujourd'hui.

Cette carte tridimensionnelle contient les positions de quatre millions de galaxies

Les motifs des BAO sont dus à la façon dont la lumière et la matière ont interagi, notamment dans l'Univers jeune après l'inflation. Le cosmos contient deux types de matière: la matière ordinaire (aussi nommée «matière baryonique», composée d'atomes que nous avons l'habitude de côtoyer dans notre vie quotidienne), qui interagit avec la lumière, et la matière noire, sans interaction avec les photons (les particules de lumière) et donc transparente. Dans l'Univers primitif chaud et dense, les atomes étaient sous forme ionisée, les noyaux atomiques étant séparés des électrons. Les photons étaient piégés au sein de ce plasma du fait de leurs fréquentes interactions avec les particules chargées. Sous l'influence de la gravité, cette matière baryonique et les photons ont été attirés par les régions de

surdensités de matière noire. Mais leur accumulation au centre de ces surdensités a créé une pression des photons qui s'est opposée à la gravité, et a entraîné la matière ordinaire et les photons en dehors de ces zones, qui se sont propagés sous forme d'ondes acoustiques (comme le son dans l'air ou les ondes sismiques à travers le manteau terrestre).

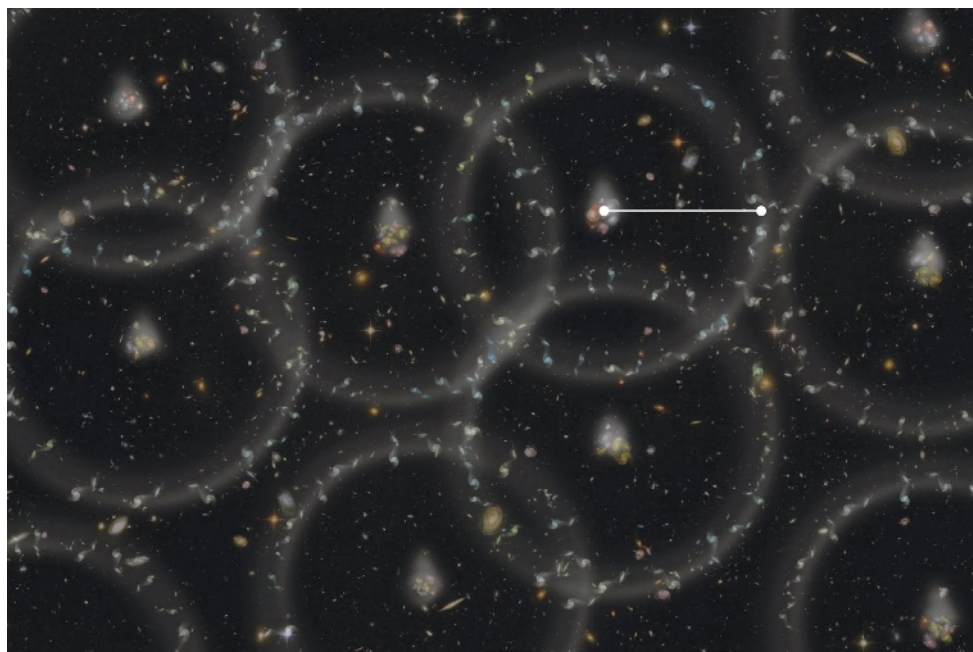
Vers 380 000 ans après le Big Bang, quand l'Univers s'est assez refroidi, le plasma a subi une transformation: les noyaux atomiques et les électrons se sont combinés, formant un gaz d'atomes neutres. Les photons n'ont alors plus interagi avec la matière ordinaire et se sont propagés librement dans l'espace. Cette première émission de lumière est encore visible dans le ciel sous la forme du fond diffus cosmologique. Une fois que la lumière et la matière n'étaient plus liées, la distribution de gaz s'est figée à une certaine distance des surdensités de matière noire, donnant ainsi naissance à des coquilles sphériques de matière baryonique. Et bien que la gravité ait continué d'attirer la matière ordinaire vers les régions les plus denses, c'est-à-dire vers les noyaux de matière noire, l'Univers a conservé une empreinte de cette époque, avec des surdensités de matière dans les régions initiales et sur le bord des coquilles de matière baryonique.

C'est ce motif dans la distribution de la matière qui est connu sous le nom d'«oscillations acoustiques des baryons». Comme ce motif s'est figé partout au même moment et de la même façon, les rayons des coquilles ont tous à peu près la même taille intrinsèque, environ 500 millions d'années-lumière. On parle d'«horizon sonore comobile» (ce dernier terme signifie que l'on fait abstraction de l'expansion de l'Univers).

Il est possible de retrouver la trace des BAO en établissant une carte de la distribution des galaxies dans le cosmos, car les galaxies sont issues des surdensités de matière baryonique. L'horizon sonore peut alors servir d'étalon pour mesurer les distances cosmiques. Lorsque nous voyons ces motifs sur nos cartes, ils apparaissent plus ou moins grands selon la distance à laquelle ils se trouvent (un objet proche semble plus grand qu'un objet de même taille, mais plus lointain). Ainsi, si nous évaluons leur diamètre apparent dans le ciel nocturne et que nous le comparons à leur taille intrinsèque, nous pouvons déterminer leur distance par rapport à la Terre.

UNE QUESTION DE VITESSE

L'étude des BAO nous permet d'estimer la distance moyenne d'un ensemble de galaxies, mais elle ne suffit pas pour retracer l'histoire de l'expansion de l'Univers. Pour cela, nous avons aussi besoin d'informations sur la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous. En



plus d'enregistrer des images profondes d'un tiers du ciel, SDSS a réalisé une analyse spectroscopique de deux millions de galaxies et de quasars (un type de galaxies très brillantes). Cette technique isole les différentes longueurs d'onde de la lumière provenant d'un objet, ce qui permet de mesurer la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous du seul fait de l'expansion de l'Univers entre le moment où la lumière a été émise et celui où elle a été observée. En effet, à cause de l'expansion, les longueurs d'onde sont étirées, la lumière devient plus rouge; c'est le phénomène de «décalage vers le rouge» (*redshift* en anglais).

Chaque observation des projets BOSS et eBOSS a enregistré simultanément les spectres lumineux de 1 000 objets. Une plaque d'aluminium percée de 1 000 trous était placée au niveau du plan focal du télescope. Et chaque trou était relié par une fibre optique aux instruments de mesure. En prévision d'une nuit d'observation, les équipes préparaient huit de ces plaques dans des cartouches spécialement conçues à cet effet. Il fallait environ une demi-heure à deux membres du personnel technique pour brancher une seule plaque. Lors du mois le plus productif du programme SDSS, nous avons analysé quelque 103 000 spectres à l'aide de ces plaques.

Les trous des plaques n'étaient pas percés au hasard. Nous sélectionnions des galaxies à observer dans une région du ciel à partir de données d'imagerie obtenues précédemment par des télescopes du monde entier. Les techniciens de l'université de Washington foraient alors les trous dans les plaques d'aluminium à l'aide d'une machine commandée par ordinateur, de sorte que lorsque le télescope

Les fluctuations quantiques primordiales ont donné naissance à des zones de surdensité où se sont formées de nombreuses galaxies. Une partie du gaz s'est retrouvée à une distance caractéristique dans des coquilles où sont nées d'autres galaxies. Dans cette vue d'artiste, le contraste entre les différentes régions, riches et pauvres en matière, a été très accentué. Mais grâce à des analyses statistiques, il est néanmoins possible de reconstruire ces motifs (en particulier le rayon des coquilles indiqué par un trait blanc) prédits par le modèle du Big Bang.

QUELLE EST LA VITESSE D'EXPANSION DE L'UNIVERS?

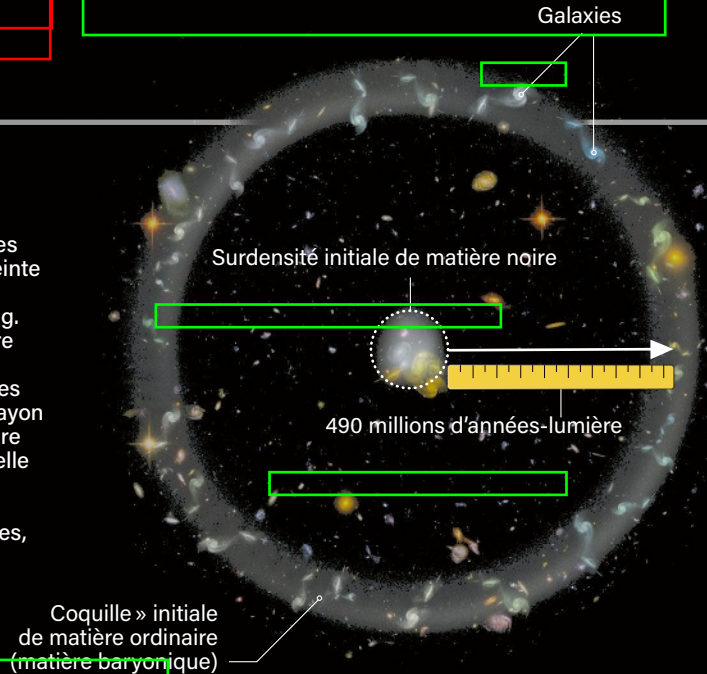
L'énergie sombre est la force qui conduit l'Univers à grandir de plus en plus vite. Pour identifier la nature de cette composante du cosmos, les astronomes ont utilisé les données du programme de relevé du ciel SDSS collectées depuis vingt ans. Ils ont ainsi dressé plusieurs cartes du cosmos

pour voir comment la vitesse d'expansion a évolué au cours du temps. La carte la plus récente a été réalisée grâce aux mesures d'eBOSS (extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey), projet du SDSS, qui a opéré de 2014 à 2019.

A Une référence de distance

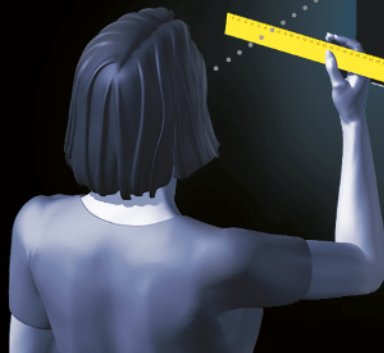
Le programme eBOSS s'est concentré sur un aspect de la distribution des galaxies dans l'Univers nommé « oscillations acoustiques baryoniques », ou BAO en abrégé. Cette empreinte est née dans de petites fluctuations d'énergie à travers l'espace-temps juste après le Big Bang. À cause de la façon dont la lumière et la matière ont interagi dans l'Univers primordial, ces fluctuations ont mené à la formation de coquilles sphériques de matière et de lumière, avec un rayon de 490 millions autour de surdensités de matière noire. Au cours du temps, la force gravitationnelle a attiré de la matière ordinaire (du gaz) dans les surdensités de matière noire et dans les coquilles. Le gaz a donné naissance aux galaxies, nombreuses dans ces régions. Il en résulte un motif régulier de noyaux et de coquilles que l'on distingue encore aujourd'hui dans la distribution des galaxies.

Coquille » initiale de matière ordinaire (matière baryonique)



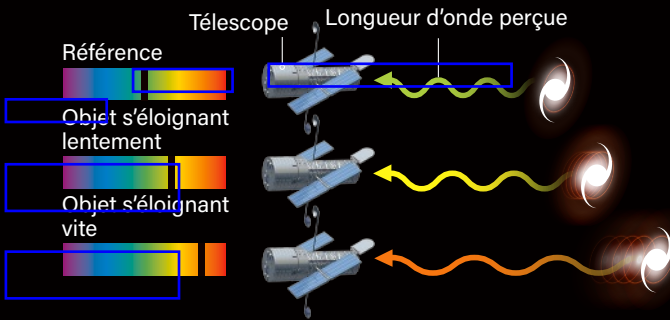
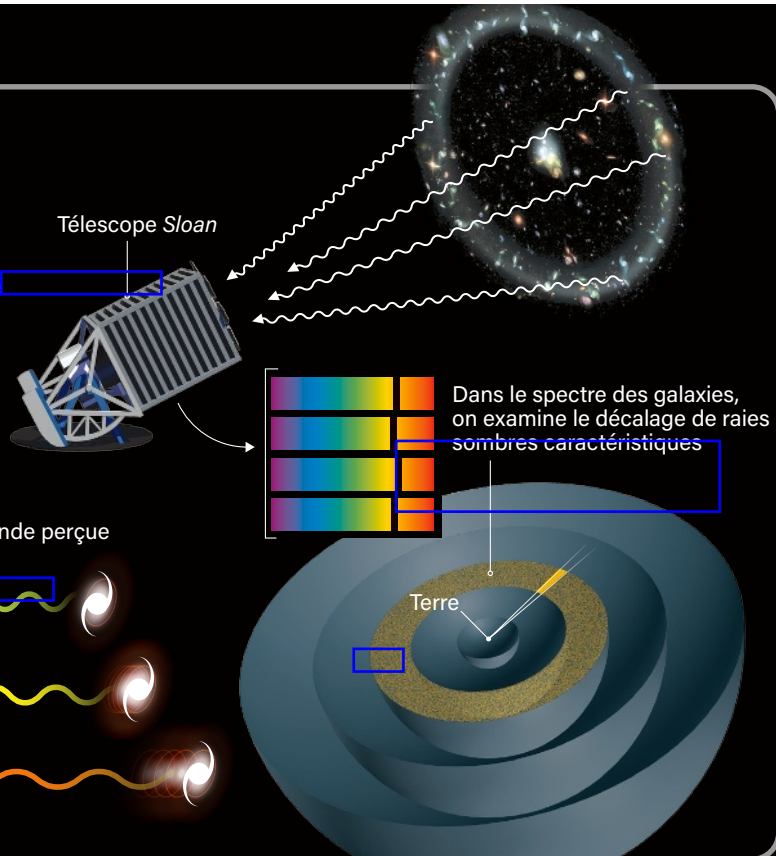
B Un étalon de distance

Le rayon des coquilles paraît plus ou moins grand selon la distance à laquelle cette structure se trouve par rapport aux astronomes. Les coquilles les plus lointaines paraîtront plus petites que celles plus proches. Mais les chercheurs savent que leur rayon est de 490 millions d'années-lumière. En comparant la taille apparente du motif des BAO avec sa taille intrinsèque, il est possible de déduire sa distance. Cette empreinte est donc un étalon pour mesurer des distances dans l'Univers.



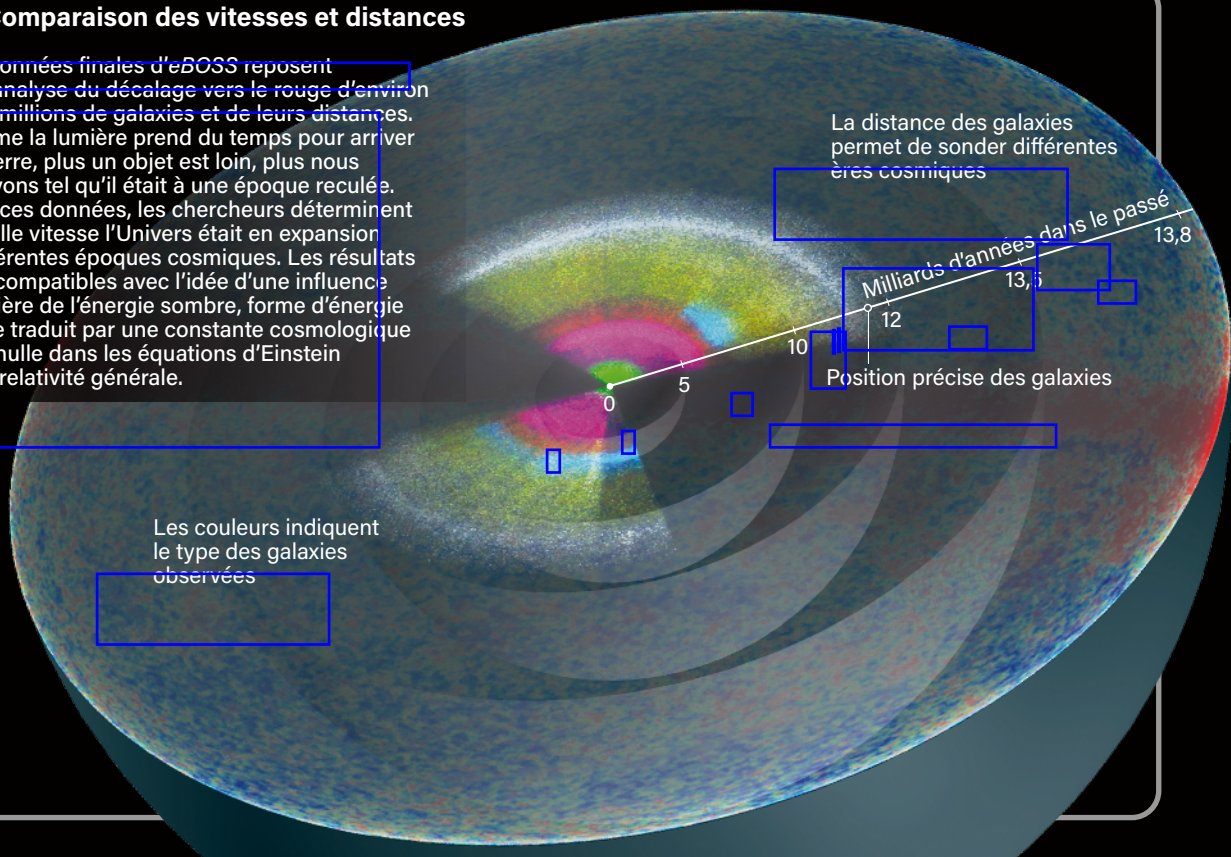
C Mesure des vitesses

L'étape suivante consiste à déterminer la vitesse à laquelle les galaxies du motif des BAO s'éloignent de nous. Comme l'Univers est en expansion, tout élément de l'Univers semble s'écarter de nous. Ce mouvement conduit les objets à paraître d'autant plus rouges qu'ils s'éloignent vite – un phénomène analogue à l'effet Doppler. Les astronomes mesurent ainsi le « décalage vers le rouge » du spectre pour en déduire la vitesse de fuite.



D Comparaison des vitesses et distances

Les données finales de eBOSS reposent sur l'analyse du décalage vers le rouge d'environ deux millions de galaxies et de leurs distances. Comme la lumière prend du temps pour arriver sur Terre, plus un objet est loin, plus nous le voyons tel qu'il était à une époque reculée. Avec ces données, les chercheurs déterminent à quelle vitesse l'Univers était en expansion à différentes époques cosmiques. Les résultats sont compatibles avec l'idée d'une influence régulière de l'énergie sombre, forme d'énergie qui se traduit par une constante cosmologique non nulle dans les équations d'Einstein de la relativité générale.



pointait vers une zone particulière du ciel pour une durée d'exposition de une heure, l'extrémité de la fibre à l'intérieur de chaque trou s'alignait parfaitement avec le centre de la galaxie ou du quasar cible.

Toutes les nuits entre décembre 2009 et mars 2019 où la Lune n'était pas trop brillante, le télescope a observé une zone du ciel et les fibres ont transmis la lumière des galaxies aux deux spectrographes. Ces instruments ont mesuré l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde et nous avons calculé le décalage vers le rouge de chaque galaxie.

Au cours des dix années pendant lesquelles BOSS et eBOSS ont recueilli des données, nous avons mesuré la position et le décalage vers le rouge de plus de deux millions de galaxies. Comme la lumière des galaxies lointaines met beaucoup de temps à atteindre le télescope, les cartes de BOSS et eBOSS permettent de voir loin et ainsi de remonter le temps, pour couvrir près de 11 milliards d'années de l'histoire de l'Univers.

SONDER L'ÉNERGIE SOMBRE

En combinant nos mesures de décalage vers le rouge avec nos estimations de distance à partir de l'étalon standard des BAO, nous avons étudié la vitesse d'expansion de l'Univers et ses variations au cours du temps. Ces informations nous permettent de mieux comprendre l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie: l'énergie sombre.

En 1998, deux équipes d'astrophysiciens ont découvert que l'expansion de l'Univers accélérât. L'explication la plus probable était que l'Univers contenait un ingrédient dont la nature exacte reste à préciser, l'énergie sombre (ou noire). Le modèle mathématique le plus simple pour décrire l'action de l'énergie sombre est celui de la constante cosmologique, un terme qui correspond à l'énergie présente dans l'espace vide. Dans les équations de la théorie de la relativité générale d'Einstein, ce terme agit comme une force répulsive qui augmente la vitesse d'expansion de l'Univers, et s'oppose à l'effet gravitationnel de la matière, qui ralentit l'expansion. Au cours des vingt dernières années, le modèle cosmologique noté Λ CDM (avec une constante cosmologique, notée Λ , et de la matière noire dite «froide», *cold dark matter*) a résisté à de nombreux tests. Bien que nous ne le comprenions pas entièrement, il s'agit du modèle qui rend le mieux compte des observations à ce jour.

Trois observations récentes laissent entrevoir des failles dans le modèle Λ CDM. La première concerne la constante de Hubble, qui est le taux actuel d'expansion de l'espace. La deuxième suggère que l'espace serait légèrement plus courbé que ne le prévoit la théorie de l'inflation. Enfin, la troisième est liée à la

vitesse de formation des grandes structures. Le temps nous dira si ces tensions entre théorie et observations sont les premiers signes qu'un nouveau modèle cosmologique est nécessaire ou si elles reflètent simplement des imprécisions dans les mesures. Quoi qu'il en soit, les observations d'eBOSS contribuent à cette réflexion en apportant leur lot de contraintes très précises.

Elles montrent par exemple qu'une transition s'est produite lorsque l'Univers avait 60% de sa taille actuelle: l'expansion de l'espace a cessé de décélérer et a commencé à s'accélérer. Ces résultats sont en accord avec le modèle Λ CDM, qui suggère que c'est à ce moment-là que l'énergie sombre l'a emporté sur l'effet gravitationnel de la matière.

La géométrie de l'espace est un autre élément crucial du modèle cosmologique. La théorie de l'inflation prédit que l'Univers est quasiment «plat», c'est-à-dire doté d'une géométrie euclidienne dans laquelle, par exemple, la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés. Mais certaines données du satellite *Planck* sur le fond diffus cosmologique sug-



Les résultats d'eBOSS sont en accord avec le modèle standard de la cosmologie



gèrent que l'espace est légèrement courbé. Grâce aux cartes d'eBOSS, nous avons amélioré la précision des mesures de la géométrie spatiale d'un facteur dix par rapport aux observations précédentes. Nous n'avons trouvé aucune preuve que l'Univers est courbé, ce qui conforte l'image standard de l'inflation.

Nous avons aussi testé les modèles cosmologiques en examinant la rapidité avec laquelle les structures – amas et filaments de galaxies – se sont formées. Les décalages vers le rouge que nous avons mesurés dans notre étude indiquent la vitesse relative des galaxies par rapport à nous, les observateurs. Une grande partie de ces décalages est due à l'expansion cosmique, c'est-à-dire au fait que tous les objets de l'espace s'éloignent les uns des autres, mais une petite partie est aussi liée à la croissance des structures. Au fur et à mesure que les galaxies se regroupent en amas et s'éloignent des vides, leurs vitesses, et donc leurs décalages vers le rouge, changent.

Les vitesses affectées par la croissance des structures sont identifiables lorsque nous comparons les motifs de galaxies observés le long et perpendiculairement à la ligne de visée. Ces mesures nous permettent alors d'estimer la rapidité à laquelle les structures se sont formées. En utilisant les données d'eBOSS et de ses prédécesseurs, nous avons calculé ce taux de croissance avec une précision d'environ 3,5%, et le résultat est compatible avec les prédictions de la relativité générale.

Dans l'ensemble, l'étude des BAO avec BOSS et eBOSS semble conforter le modèle standard du Big Bang avec constante cosmologique. Nous ne voyons aucune surprise dans la croissance des structures, la dynamique de l'énergie sombre ou la géométrie de l'espace. La seule situation qui reste vraiment problématique est celle qui concerne la constante de Hubble. À partir des mesures du fond diffus cosmologique, notamment grâce au satellite *Planck*, l'estimation du taux d'expansion est de $67,28 \pm 0,61$ kilomètres par seconde et par mégaparsec (1 mégaparsec correspond à environ 3,26 millions d'années-lumière). Mais si les astrophysiciens évaluent la constante de Hubble en utilisant des « chandelles standard » comme les étoiles céphéides et les supernovæ de type Ia, les valeurs sont 10% plus élevées. Et les incertitudes sur les mesures sont trop petites pour justifier un tel écart.

En utilisant nos mesures sur les BAO, nous estimons la constante de Hubble à environ 67 kilomètres par seconde et par mégaparsec, que nous combinions ou non nos chiffres avec les données du fond diffus cosmologique. Comment comprendre l'écart entre les deux mesures cosmologiques (BAO et fond diffus cosmologique) et les mesures astrophysiques (chandelles standard)? La différence est assez importante pour remettre en question les hypothèses de base de notre modèle cosmologique. Il se peut qu'il y ait encore un problème avec une ou plusieurs des mesures qui alimentent ces calculs, mais il est au moins aussi probable que nous devions réviser le modèle de l'expansion précoce de l'Univers et de l'horizon sonore comobile. Nous devons peut-être introduire un nouveau type de particule, de champ ou d'interaction pour expliquer le désaccord.

PLUS GRAND, PLUS FORT

Au cours des vingt dernières années, le programme SDSS et ses spectrographes ont été à la pointe dans l'étude des décalages vers le rouge des galaxies, notamment grâce à eBOSS. Le programme se poursuit afin d'obtenir des cartes d'étoiles et de quasars toujours plus vastes et précises. Sa réussite a suscité le développement de nouveaux projets pour



À partir de 2000, le télescope de 2,5 mètres de la fondation Sloan, situé au Nouveau-Mexique, a été au cœur d'un ambitieux programme de cartographie de l'Univers, le SDSS (Sloan Digital Sky Survey).

comprendre l'histoire cosmique. L'un de ceux-ci, qui a commencé ses premières opérations scientifiques, se nomme DESI (*Dark energy spectroscopic instrument*, instrument spectroscopique pour l'étude de l'énergie sombre). Il utilisera un spectrographe à 5 000 fibres optiques installé sur le télescope *Mayall* de l'observatoire national de Kitt Peak, en Arizona. Ce nouveau spectrographe, capable d'observer 5 000 cibles simultanément, est placé sur un télescope dont le miroir primaire a un diamètre environ deux fois plus grand que celui du télescope *Sloan*. Plutôt que de faire appel à des humains, chacune des 5 000 fibres sera positionnée grâce à un robot dédié. Dans cinq ans, DESI sera en mesure de produire une carte des galaxies qui sera plus de dix fois plus grande que celle de SDSS.

Prévu pour être lancé en 2022, le satellite *Euclid*, dirigé par l'Agence spatiale européenne, effectuera aussi un grand relevé des décalages vers le rouge des galaxies. Grâce à sa position dans l'espace, qui lui évite les perturbations dues aux turbulences de l'atmosphère terrestre, *Euclid* examinera des décalages vers le rouge plus importants (c'est-à-dire à des distances plus grandes) que ceux que l'on peut voir clairement depuis le sol. Il mesurera les décalages vers le rouge d'environ 35 millions de galaxies. Outre DESI et *Euclid*, d'autres projets de grands spectrographes multiobjets sur des télescopes plus grands, d'environ 10 mètres de diamètre, sont à l'étude. De quoi faire un grand pas en avant dans notre compréhension de l'Univers. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Alam et al., **Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory**, *Physical Review D*, vol. 103, article 083533, 2021.

B. W. Lyke et al., **The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog : Sixteenth data release**, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 250(1), article 8, 2020.

A. J. Ross et al., **The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Large-scale structure catalogues for cosmological analysis**, *MNRAS*, vol. 498(2), pp. 2354-2371, 2020.

M. Aubert et al., **The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Growth rate of structure measurement from cosmic voids**, en ligne sur arXiv.org, 17 juillet 2020.

J. Frieman, **Le projet DES à la poursuite de l'énergie sombre**, *Pour la Science*, n° 467, septembre 2016.

JEAN-JACQUES HUBLIN
est directeur du département
Évolution humaine à l'institut
Max-Planck d'anthropologie
évolutive, à Leipzig,
en Allemagne, département
qu'il a créé en 2004. Il est aussi
depuis 2014 professeur au Collège
de France, où il occupe
la chaire internationale
de paléanthropologie.
Ses nombreux travaux en font un
éminent spécialiste des espèces
du genre *Homo*.



Non, on ne vient pas de découvrir deux nouvelles espèces humaines!

Deux équipes internationales ont publié chacune la découverte d'une nouvelle espèce humaine datant d'environ 140 000 ans : l'homme de Nesher Ramla, en Israël, et l'« homme dragon », en Chine. Le genre *Homo* s'est-il ainsi agrandi de deux espèces, alors qu'on lui en connaît déjà une douzaine ? Comme plusieurs autres paléanthropologues, Jean-Jacques Hublin le conteste. Il nous explique pourquoi.

En juin 2021, Israel Hershkovitz, de l'université de Tel Aviv, et des collègues de plusieurs pays ont annoncé la découverte d'une nouvelle forme humaine : l'« *Homo* de Nesher Ramla », mis au jour dans un site du centre d'Israël et datant de 120 000 à 140 000 ans. Et une autre équipe, autour de Xijun Ni, de l'université géologique du Hebei, en Chine, a introduit, sur la base de fossiles mis au jour à Harbin, en Chine du nord, un *Homo longi*, ou « homme dragon », âgé de quelque 150 000 ans.

Le matériel étudié par l'équipe d'Israel Hershkovitz consiste en un pariétal et une mandibule. Pourquoi ces fossiles ne justifient-ils pas, selon vous, l'introduction d'une nouvelle espèce humaine, différente des Néandertaliens ?

Je connais ce matériel, puisque j'étais à l'origine associé à l'étude de ces fossiles. D'ailleurs, mon équipe a fourni certaines des données comparatives utilisées dans la publication d'Israel Hershkovitz et ses collègues. Il est vrai que le pariétal est un peu inhabituel dans sa forme, son épaisseur et d'autres traits, mais un pariétal est un os crânien moins diagnostique que certains autres. En outre, la reconstitution de ce fossile fragmentaire suppose une bonne dose d'interprétation, même si nos méthodes d'analyse ont fait de très grands progrès.

À quels progrès pensez-vous ?

Aujourd'hui, les paléanthropologues étudient les fossiles en répartissant à l'aide de logiciel des centaines de repères anatomiques sur eux. On ne procède plus en identifiant quelques traits comme jadis, mais à partir de l'ensemble de la configuration en trois dimensions, décrite par des valeurs numériques considérées comme des variables aléatoires liées entre elles. Cela permet de définir des « composantes principales », des combinaisons de ces variables permettant de réduire l'information redondante, apportée par les centaines de traits pris en compte, à seulement deux ou trois axes. Dans le plan défini par ces composantes principales, on place des points représentant des individus de telle ou telle espèce. Or, où se trouve le pariétal de Nesher Ramla sur ce plan ? Juste à côté des Néandertaliens d'Europe... que l'on connaît surtout à partir de fossiles datant de quelque 50 000 à 60 000 ans. Dès lors, est-il étonnant qu'un os de la même espèce, à la fois très fragmentaire, datant de 120 000 ans et trouvé au Proche-Orient, soit un peu différent du même os néandertalien européen ? Non.

Si le pariétal est peu diagnostique, la mandibule l'est peut-être davantage ?

Les mandibules humaines sont des os très variables, mais toutes les mandibules non

sapiens de la fin du Pléistocène moyen se ressemblent un peu : elles sont robustes, sans menton, etc. La lignée néandertalienne se distingue par quelques particularités. La mandibule de Nesher Ramla est assez abîmée, mais les analyses morphométriques de l'équipe d'Israel Hershkovitz montrent qu'elle est elle aussi très proche de celles des Néandertaliens. Plus significatif encore : les dents, certes cassées mais toujours présentes. Une seconde molaire permanente est en place. Si partout ailleurs on trouvait une telle dent, personne n'aurait d'état d'âme pour la déclarer néandertalienne ! Les caractères de ses racines et de sa couronne le sont, et sa jonction émail-dentine tombe exactement dans la distribution néandertalienne. Or, chez les primates, la topographie du joint émail-dentine est très diagnostique et constitue l'un des moyens les plus puissants pour identifier une espèce. Que dire de plus ?

Mais n'est-il pas étonnant que des Néandertaliens aient vécu au Proche-Orient il y a 120 000 ans ?

Non, car plusieurs sites, plus récents que Nesher Ramla, ont déjà montré leur présence dans la région. L'individu de Nesher Ramla a été trouvé avec une industrie lithique moustérienne comportant ce que l'on nomme du débitage Levallois centripète. Après l'avoir d'abord attribuée à *Homo sapiens*, les paléanthropologues se sont aperçus qu'au Proche-Orient il est difficile d'assigner un type de moustérien à un groupe ou à un autre. Pour moi, il est clair qu'à la fin du Pléistocène moyen une frontière entre les populations humaines africaines et eurasiatiques passait au Levant. Elle fluctuait au fil des changements climatiques et le Levant était certainement une zone d'hybridation, ce qui explique peut-être certaines particularités de l'individu de Nesher Ramla. Mais quand l'équipe d'Israel Hershkovitz en arrive à imaginer que ce spécimen représente la population ancestrale des Néandertaliens, qui, selon ces chercheurs, auraient donc évolué au Proche-Orient, c'est pour le moins... inattendu ! Les centaines de fossiles accumulés depuis cent cinquante ans prouvent en effet clairement qu'*H. neanderthalensis* a émergé bien plus tôt et en Europe.

Comment s'y est prise pour sa part l'équipe de Xijun Ni, qui a étudié le crâne de Harbin ?

Là, il s'agit d'un crâne extraordinaire tant par sa conservation que par son histoire. Mis au jour dans les années 1930 durant l'occupation japonaise du nord de la Chine, il a été caché dans un puits, puis donné par son découvreur sur son lit de mort à ses héritiers. Pour comprendre comment l'équipe chinoise s'y est prise, il faut savoir ce qu'est un arbre phylogénétique...

LE PLÉISTOCÈNE

Cette ère géologique, qui s'étend de 2,58 millions d'années à 11 700 ans avant notre ère, correspond à l'essentiel de la période d'évolution du genre *Homo*. Le Pléistocène moyen, entre 781 000 ans et 126 000 ans, est la période d'évolution des formes humaines qui ont le plus contribué aux humains modernes.



C'est un arbre de parenté, une sorte d'arbre généalogique des espèces ?

Oui... et non. La construction d'un arbre phylogénétique est très différente suivant que l'on dispose de matériel génétique ou pas. S'agissant de ce crâne daté par l'équipe de Xijun Ni d'environ 150 000 ans, il n'y a pas de matériel génétique. Établir un arbre phylogénétique est alors assez compliqué, parce que l'on ne peut s'appuyer que sur l'anatomie des fossiles. Toutefois, la ressemblance anatomique ne peut pas être utilisée comme la ressemblance entre des génomes, qui, elle, permet de calculer des distances génétiques. La morphologie osseuse n'est pas une traduction simple du génome. Ce n'est pas parce qu'il y a beaucoup de différences entre deux génomes qu'il existe de grandes différences morphologiques. Et le contraire est vrai aussi : il est possible qu'une mutation affectant un seul nucléotide sur 3,2 milliards ait un effet radical sur le phénotype, en d'autres termes sur la forme de l'individu.

Les paléanthropologues ont pris conscience de ces problèmes il y a longtemps, et y ont notamment remédié en adoptant la cladistique. Selon cette méthode, tous les caractères morphologiques n'ont pas le même poids. Certains sont primitifs et hérités d'un ancêtre commun, de sorte que leur présence n'a guère d'intérêt en termes d'identification de relations de parenté – par exemple, tous les tétrapodes ont quatre membres ! Ce qui est important, ce sont les caractères dérivés, ceux qui, comme leur nom l'indique, ont changé – dérivé – depuis un ancêtre commun plus ou moins proche.

C'est la méthode suivie par l'équipe de Xijun Ni ?

Oui. La mise en œuvre de la cladistique est assez compliquée et nécessite l'emploi d'outils informatiques. Pour comparer des fossiles, on crée une matrice de caractères, c'est-à-dire des tableaux de nombres disposés en lignes et colonnes, où chaque nombre code, pour le fossile considéré, l'état plus ou moins dérivé du caractère. Un programme traite ensuite tout cela et livre des arbres de parenté probables. Ce point est très important : ces arbres ne sont que « probables » et ces analyses produisent toujours plusieurs solutions affectées de probabilités différentes. On peut ainsi arriver à des arbres différents mais aux probabilités proches... C'est ce qu'a fait l'équipe de Xijun Ni : elle a construit une matrice de caractères, qu'elle n'a pas fournie dans sa publication, puis, après avoir fait tourner un programme, proposé des âges de divergence entre espèces, bref l'arbre phylogénétique du genre *Homo* le plus probable selon elle.

Et comment est cet arbre ?

Pour le moins bizarre ! Ces chercheurs aboutissent à un arbre et à des dates de divergences entre ses branches en contradiction avec tout ce que l'on sait par ailleurs aujourd'hui. Je suis donc très réservé sur leurs conclusions, à savoir que la mandibule de Xiahe – dont j'ai contribué à montrer qu'elle est dénisovienne –, le crâne de Harbin et d'autres crânes similaires de Chine représentent un groupe frère d'*Homo sapiens*.

Pourquoi est-ce bizarre ?

Parce que la paléogénétique contredit totalement une telle conclusion ! Tout d'abord, les

Ci-dessus, les deux fossiles de Neshar Ramla : une mandibule fragmentaire (à gauche) comportant deux dents, dont une seconde molaire permanente assez bien conservée, et un fragment d'os pariétal (à droite).



Les deux photos ci-contre montrent le crâne exceptionnellement bien conservé de Harbin, de face et de biais.

données génétiques démontrent massivement l'origine africaine récente de tous les hommes modernes. Les preuves sont multiples. Ainsi, toutes les lignées mitochondriales que l'on trouve hors d'Afrique s'enracinent dans une lignée africaine. L'ADN des mitochondries n'est transmis que dans les lignées féminines, qui proviennent toutes d'Afrique. Le même phénomène s'observe avec le chromosome Y, qui, lui, n'est transmis que par les hommes. Plus généralement, on constate que la variabilité génétique est plus grande en Afrique qu'ailleurs. En fait, c'est très simple: pour se représenter la génétique de l'humanité actuelle, il suffit d'imaginer un arbre enraciné dans un jardin africain, mais dont une branche passe au-dessus du mur et s'avance dans le jardin eurasiatique voisin. L'origine africaine récente de l'homme moderne, c'est cela.

Mais, surtout, dans son article, l'équipe de Xijun Ni évoque en filigrane les Denisoviens et dit – avoue ! – que les dents encore présentes sur le crâne de Harbin ressemblent aux dents des hommes de la grotte de Denisova et à celles de la mandibule de Xiahe, qui est dénisovienne... J'ai le plus grand mal à comprendre tous ces efforts pour contourner la conclusion évidente : tous ces fossiles chinois sont en fait dénisoviens. Or les données paléogénétiques offrent un arbre phylogénétique des *Homo* eurasiatiques de la fin du Pléistocène autrement plus robuste que celui que cette équipe a construit, puisque nous disposons de génomes pour ces espèces (*H. neanderthalensis*, *H. sapiens* et les Dénisoviens). Et dans cet arbre, les Dénisoviens sont le groupe frère des Néandertaliens, et non celui d'*H. sapiens*.

BIBLIOGRAPHIE

I. Hershkovitz et al.,
A Middle Pleistocene
***Homo* from Nesher Ramla,**
Israel, Science, vol. 372,
pp. 1424-1428, 2021.

M. M. Lahr, **The complex landscape of recent human evolution**, *Science*, vol. 372, pp. 1395-1396, 2021.

X. Ni *et al.*, **Massive cranium from Harbin in northeastern China establishes a new Middle Pleistocene human lineage**, *The Innovation*, en ligne le 25 juin 2021.

Q. Li *et al.*, **Late Middle Pleistocene Harbin cranium represents a new *Homo* species**, *The Innovation*, en ligne le 25 juin 2021.

Vous êtes donc surpris que Xijun Ni et ses collègues introduisent l'espèce *Homo longi*?

Je ne le comprends pas et je suis surpris par leur choix de nom: dans le groupe de fossiles associé au crâne de Harbin dans leur arbre phylogénétique, il y a en effet déjà un fossile pourvu d'une dénomination latine: le crâne de Dali, daté d'environ 300 000 ans. Comment peuvent-ils ignorer le code international de la nomenclature zoologique sur lequel tout le monde s'est mis d'accord depuis longtemps? Une fois que l'on a donné un nom à un groupe de fossiles, on n'en change plus... Si l'on est cohérent avec leur étude, leur fossile doit s'appeler *Homo daliensis* et non pas *Homo longi* [qui signifie «homme dragon»]. Je pense par ailleurs que d'autres fossiles chinois, que cette équipe a exclus de ce groupe, appartiennent en fait à la même espèce. C'est notamment le cas de l'homme de Mapa, doté lui aussi d'un nom latin et bien avant *Homo daliensis*. Ce groupe, je le répète, c'est tout simplement celui que l'on a découvert par la génétique à Denisova: les Denisoviens.

Pourquoi l'équipe de Xijun Ni éviterait-elle le modèle de l'origine africaine récente de l'homme moderne pour proposer une relation directe entre *H. sapiens* et des fossiles chinois?

Une particularité de la culture scientifique chinoise est d'être restée attachée au « modèle de l'origine multirégionale de l'homme moderne ». Selon cette théorie, les *Homo* du Pléistocène de chaque région du monde auraient évolué pour donner les hommes modernes: les Européens descendraient des Néandertaliens, les Australiens des *Homo erectus* javanais, les Extrême-Orientaux d'une forme pléistocène locale, et ainsi de suite. Ce modèle a été fortement défendu en 1984 par Milford Wolpoff, de l'université du Michigan, par Alan Thorne, de l'université de Sydney, et par Xinzhi Wu, à l'époque directeur de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléanthropologie de Pékin. Par la suite, les paléanthropologues chinois ont longtemps continué à adhérer au modèle de l'origine multirégionale de l'homme moderne. Pour autant, le consensus scientifique écrasant aujourd'hui est que l'essentiel des génomes des hommes modernes provient d'Afrique, ce qui explique un fait incontournable: les anatomies des hommes modernes de toutes les régions du monde se ressemblent de très près.

Que conclure alors de tout cela ?

Pour être bref: non, on ne vient pas de découvrir deux nouvelles espèces humaines! On vient seulement d'étudier les fossiles d'un Néandertalien, au Proche-Orient, et d'un Dénisovien, en Chine. ■

Propos recueillis par François Savatier

Quand le tigre et le lion cohabitaient en Asie

Il n'y a pas si longtemps, les lions et les tigres étaient largement répandus en Asie et vivaient en partie dans les mêmes régions. Comment ont-ils coexisté, et pourquoi sont-ils aujourd'hui proches de l'extinction ?

Il fut un temps où cohabitaient, très loin de leurs lieux d'origine, les deux félins les plus imposants du monde moderne, le lion d'Asie (*Panthera leo persica*, une sous-espèce du lion *Panthera leo*) et le tigre (*Panthera tigris*). De l'Inde au Moyen-Orient, ces deux superprédateurs, connus pour leur grande mobilité, ont ainsi vécu dans les mêmes écosystèmes, explorant et investissant forêts, plaines alluviales, steppes, montagnes et hauts plateaux.

Que connaît-on précisément de leur histoire commune ? Bien peu en vérité. Car, en dépit d'un charisme très ancien dans l'univers mental et culturel des humains, tigre et lion ont été, des siècles durant et dans beaucoup d'endroits, victimes de chasses incontrôlées qui les ont menés à l'extinction, avant même que l'on ait pu restituer leur histoire. Récemment, cependant, nous avons entrepris de synthétiser les nombreuses mais éparpillées études zoologiques ou archéologiques livrant des informations sur la présence passée ou actuelle de ces deux félins en Asie. Et nous y avons ajouté les résultats d'une étude que nous avons menée de 2010 à 2018 sur un grand nombre de pétroglyphes, c'est-à-dire des dessins gravés sur des pierres en plein air, présents au Kirghizistan et au Kazakhstan.

Reconstituer la longue histoire asiatique de ces fauves nécessite des approches pluridisciplinaires, qui impliquent archéologie, paléontologie, génétique, histoire, zoologie et écologie de la conservation. La tâche n'est guère facile, car la répartition actuelle des espèces n'est généralement pas un indicateur univoque de leur répartition historique. En effet, bien des facteurs peuvent entrer en jeu dans l'occupation à long terme d'un territoire : des fluctuations climatiques parfois sévères jouent sur la diversité en espèces des proies, leurs effectifs, leurs tailles, ce à quoi s'ajoutent la compétition avec d'autres prédateurs ainsi que l'impact des humains et de leurs activités.

LA NÉCESSITÉ DE FAISCEAUX D'INDICES

Ossements découverts dans des sites archéologiques, peintures, objets ou pierres gravées, mobilier et sources écrites servent de fil conducteur pour évaluer la présence des deux félins dans un territoire donné. Mais le

Cette peinture sur papier, de l'artiste indien Chateri Gumani, date de 1779. Elle représente le maharajah Umaid-Singh I^{er}, dirigeant de l'État princier de Kotah (intégré aujourd'hui au Rajasthan), chassant des lions. Ces félins avaient déjà presque disparu de cette région au XVIII^e siècle.



L'ESSENTIEL

> Au cours des dix derniers millénaires, le tigre et le lion ont colonisé le continent asiatique.

> Une partie des territoires qu'ils ont occupés, précisés par des études récentes, étaient communs.

> Ces territoires se sont fortement réduits sous l'effet de fluctuations climatiques et, surtout, de la pression anthropique.

> Le lion d'Asie et le tigre sont aujourd'hui menacés de disparition, mais des efforts de conservation, en particulier en Inde, semblent porter leurs fruits.

LES AUTEURS



ANNIK SCHNITZLER
professeuse honoraire à l'université de Lorraine, chercheuse associée au département Homme et environnement du MNHN



LUC HERMANN
historien de l'art et archéologue indépendant, conseiller scientifique au musée de Tamgaly, au Kazakhstan



problème est qu'aucune de ces données n'est totalement fiable.

Par exemple, les ossements d'animaux trouvés dans les sites archéologiques ne signifient pas forcément que ces animaux aient vécu librement aux alentours, car ils ont pu être importés par le commerce des fourrures ou maintenus en captivité. Quant aux représentations sous forme de gravure ou de peinture, elles sont souvent imprécises dans leurs formes; elles peuvent aussi illustrer une symbolique plutôt qu'une présence réelle.

Considérons ainsi les pétroglyphes. Ils sont abondants en Asie occidentale et centrale. On en a découvert plus de 14000 datant de l'âge du Bronze (2700 à 900 avant notre ère), 25000 de l'âge du Fer (IX^e-III^e siècles avant notre ère) et 4000 de la période médiévale turque (VIII^e-XII^e siècles). Leur description est en cours par l'un de nous (Luc Hermann). Ces travaux mettent en évidence la présence d'une très riche faune dans tous les sites investis par le tigre et le lion. Mais les félinés ne sont pas toujours faciles à identifier, ni à distinguer des canidés. On peut les différencier de ces derniers par leurs longues queues courbées et leurs oreilles rondes, ainsi que par un museau plus aplati. Les lions sont reconnaissables à leur aspect massif, leur très grosse tête qui suggère une crinière pour les mâles, et une touffe de poils au bout de la queue, alors que les tigres sont souvent représentés avec une collerette de poils autour du cou.

Par ailleurs, les récits de chasse sont plus ou moins fiables selon les époques et la rigueur scientifique des auteurs. Par exemple, l'historien romain Quinte-Curce relate une chasse au lion d'Alexandre le Grand à Kondo, dans le nord de l'actuel Afghanistan, mais il pourrait s'agir plutôt d'une chasse au tigre, la description de l'animal étant très imprécise.

UNE PRÉSENCE DE GRANDS FÉLINS DÉJÀ ATTESTÉE AU PLÉISTOCÈNE SUPÉRIEUR

Malgré toutes ces difficultés, il est possible d'esquisser l'histoire de l'expansion en Asie du tigre et du lion. On doit une grande partie de ces connaissances aux travaux récents de Ross Barnett, aujourd'hui à l'université de Copenhague, et ses collègues (pour le lion) et de David Cooper, de l'université d'Édimbourg, et ses collaborateurs (pour le tigre).

Au cours du Pléistocène supérieur (époque qui a débuté il y a environ 126000 ans), le tigre s'est répandu vers l'ouest et le nord de l'Asie à partir de son aire d'origine, qui était le sud-est de l'Asie. Son arrivée dans la péninsule indienne s'est produite autour de 21000 BP (BP, pour *before present*, désigne par convention une date donnée en nombre d'années avant 1950), durant l'époque la plus froide du Pléistocène supérieur.

La colonisation asiatique du tigre s'est accélérée lors du réchauffement climatique de la fin du Pléistocène, il y a environ 12000 ans, réchauffement qui a libéré de nouveaux habitats adaptés. Un autre facteur a probablement aidé cette expansion: la disparition progressive, jusqu'à son extinction autour de 11000 BP, du lion des cavernes (*Panthera spelaea*). Le tigre a alors pu gagner l'Asie centrale en passant par un étroit corridor séparant le plateau himalayen du désert de Gobi. Cette population a donné les tigres de la Caspienne. Certains de ces tigres ont quitté ensuite l'Asie centrale pour

La disparition du lion des cavernes a sans doute aidé l'expansion des deux fauves

occuper la Sibérie, donnant les tigres de l'Amour. Ainsi pourrait s'expliquer le fait que les populations d'Asie centrale et de Sibérie soient génétiquement plus proches entre elles qu'avec les populations d'Asie du Sud-Est.

Quant au lion moderne, les études génétiques publiées en 2014 par Ross Barnett et ses collègues montrent qu'il est sorti d'Afrique en deux vagues. La première a eu lieu il y a 21000 ans, lorsque le Sahara traversait une période très aride, liée à l'extension maximale des glaces dans l'hémisphère Nord. Le lion a alors colonisé le Moyen-Orient et est arrivé en Inde. Une deuxième vague a fait le même trajet vers le milieu de l'Holocène (l'époque qui s'étend sur les 12000 dernières années). Et la dynamique de colonisation de ce félin a sans doute elle aussi profité de l'extinction du lion des cavernes.

Le lion d'Asie et le tigre ont ainsi vécu plus d'une dizaine de milliers d'années dans les mêmes territoires. Ils en ont été progressivement extirpés au cours des derniers siècles, à des degrés variables selon les conditions écologiques et les pressions anthropiques, non seulement par la chasse, mais aussi par la destruction de leurs habitats et la disparition de leurs proies.

LES APPORTS DES DOCUMENTS ANCIENS

Pour ce qui est des deux derniers millénaires, la présence en Asie des deux grands félinés est documentée par des archives archéologiques et des textes. Dans l'étude sur les pétroglyphes

d'Asie centrale et occidentale, incluse dans notre article sur la distribution historique du lion et du tigre publié en 2019, nous avons identifié environ 160 représentations de félins, appartenant à plusieurs espèces: des panthères, des lynx, des guépards, des lions, des tigres. Parmi elles, une trentaine se rapportent aux lions ou tigres. À cela s'ajoutent des ossements de lions datant de l'âge du Bronze et découverts en Arménie par le zoologiste russe Nikolai Kuzmich Vereshchagin dans les années 1950.

On constate que le nombre de lions représentés diminue fortement entre l'âge du Bronze et l'âge du Fer, et devient quasiment nul à l'époque médiévale. Les représentations du tigre suivent ce même schéma, avec toutefois la différence qu'elles sont encore bien présentes à l'âge du Fer, pour diminuer ensuite au Moyen Âge. Mais il est difficile de dire si cette raréfaction des pétroglyphes correspond à une extinction des espèces dans les différentes

régions étudiées ou si elle reflète un changement de mentalités: tigre et lion ont peut-être cessé d'être représentés pour des raisons culturelles, tout en continuant à être présents

UNE PRÉSENCE AVÉRÉE EN ASIE OCCIDENTALE

D'autres sources témoignent de la présence des deux félins dans l'Antiquité, au Moyen Âge ou à l'époque moderne. Commençons par l'Asie occidentale. Le tigre, par exemple, était chassé en Arménie pour approvisionner les cirques romains. En Géorgie, les lions étaient jusqu'au ^x^e siècle assez communs dans les riches écosystèmes des plaines alluviales de Kura-Arak et Mugan et jusqu'à la péninsule d'Apsheron. Des sculptures stylisées de lion, datant des ^{xiii}^e et ^{xiv}^e siècles, ont aussi été trouvées dans des tombes. Si le lion semble s'être éteint dans cette région avant les Temps modernes, le tigre a subsisté dans les forêts des

Cette peinture de 1790 et d'auteur inconnu représente une chasse au tigre, de nuit, du maharajah Umaid-Singh I^{er}. La végétation illustrée dans de telles œuvres est généralement plus dense pour les chasses au tigre que pour les chasses au lion, ce qui reflète les différences dans les milieux habituellement fréquentés par les deux espèces.





montagnes et les plaines alluviales de Kura jusqu'aux XVIII^e et XIX^e siècles. En Azerbaïdjan, le tigre était si commun qu'on en tuait tous les ans dans les années 1860. Le dernier individu a été tué en 1964.

L'est de la Turquie et les montagnes d'Iraq et d'Iran étaient aussi bien pourvus en félins, et ce jusqu'au XVIII^e siècle. Ainsi, le célèbre mont Ararat, dans l'est de l'Anatolie, était réputé au XIX^e siècle «infesté de tigres jusqu'à la limite des neiges éternelles», comme l'indique un livre sur les «mangeurs d'hommes» publié en 1931 par Reginald Burton, un officier anglais de l'armée indienne.

Le tigre et le lion hantaient aussi les hautes vallées du Tigre et de l'Euphrate, jusque dans les marais où l'on chassait ces fauves ainsi que l'éléphant et l'aurochs. Ces vallées connaissaient une longue tradition d'exportation des lions dans différentes contrées du Moyen-Orient. Au milieu du IV^e siècle, les lions capturés dans le nord de la Mésopotamie étaient envoyés à Constantinople afin de participer à des jeux de cirque, en particulier ceux organisés par les empereurs. Le lion a disparu de ces montagnes au cours du XIX^e siècle, mais le tigre a davantage résisté, les derniers individus y ayant été tués en 1970.

Ainsi, en Asie occidentale, les preuves de la présence de populations des deux grands fauves sont avérées. Cette région est soumise à un climat continental aux étés très chauds et aux hivers froids, sauf au sud de la mer Caspienne, où le climat est plus doux et humide. On y trouve de larges plaines alluviales, de très hautes montagnes atteignant 4000 mètres d'altitude, des plateaux semi-arides, des déserts et des forêts denses.

Les proies potentielles y étaient abondantes, ce qui explique la présence d'autres carnivores (guépard, léopard, lynx, ours brun, hyène rayée, chacal...). Dans un lointain passé, de grands herbivores, tels que l'élan, le bison du Caucase et l'aurochs, vivaient dans les plaines d'Azerbaïdjan, ainsi que dans les monts Talyeh

Des pétroglyphes du Kirghizistan.

À gauche, un pétroglyphe de l'âge du Fer ancien montrant des figures anthropomorphes, des félins et des caprins. À droite, un pétroglyphe de l'âge du Bronze avec trois figures anthropomorphes chassant un félin qui chasse un caprin. De tels vestiges sont autant d'indices pour reconstituer la répartition historique des espèces animales.

et Zagros, en Iran, jusque dans les montagnes du Tigre. D'autres herbivores devenus très rares de nos jours y vivaient également (le cerf maral, la chèvre sauvage et le mouflon dans les alpages, une gazelle dans les steppes et les plateaux arides, l'onagre de Perse, l'âne sauvage...). Du côté de l'Iraq s'y ajoutait l'éléphant.

DES HABITATS MOINS FAVORABLES EN ASIE CENTRALE

En revanche, les habitats d'Asie centrale sont bien moins favorables, pour des raisons climatiques. La continentalité accentuée se manifeste en effet par une tendance aride et par des écarts de température saisonniers très importants, avec des hivers très froids. Les forêts se restreignent pour l'essentiel aux bordures de grands fleuves et affluents de l'Amou-Daria et Syr-Daria. Mais l'Asie centrale était alors bien pourvue en steppes, riches en troupeaux de chevaux sauvages, gazelles et antilopes saïgas (espèce aujourd'hui menacée de disparition).

Il n'en reste pas moins que ces grands troupeaux, de même que les animaux forestiers réfugiés dans les forêts riveraines, ont dû beaucoup souffrir des fluctuations climatiques sévères (froid et sécheresse) qui se sont produites il y a 8200, 5200 et 4200 ans dans toute l'Eurasie. Est-ce pour ces raisons que le lion a disparu de l'Asie centrale dès le Moyen Âge? Au stress dû aux conditions climatiques se sont ajoutés des facteurs limitants tels que la chasse et la compétition avec le tigre, et l'on peut

Ces félins hantaient aussi les hautes vallées du Tigre et de l'Euphrate

supposer que cela a eu raison de l'espèce, qui était déjà à la limite de son aire de répartition.

Le tigre, lui, s'est maintenu en Asie centrale jusqu'au xx^e siècle, sans doute grâce à sa capacité à résister aux hivers froids. Il y a disparu, victime des persécutions humaines et de la disparition des proies, entre la fin du xix^e et le début du xx^e siècle. Sa présence était encore signalée en 1950 dans les hautes vallées du Tadjikistan et en Afghanistan.

INDE, PAKISTAN : DES MILIEUX IDOINES

En contraste avec les latitudes moyennes, les latitudes plus basses de l'Asie des moussons, dans une partie du Pakistan et l'Inde du nord, étaient bien plus favorables au tigre et au lion. D'une part parce que ces deux fauves sont d'origine tropicale, d'autre part parce que les milieux naturels y étaient formidablement divers : forêts tropicales sèches et humides, fourrés, plaines alluviales, marais, zones de montagne boisées et prairies de haute altitude. Tous ces écosystèmes étaient riches en grande faune : éléphant, rhinocéros indien, grands bovidés, âne sauvage, cervidés... La richesse en capridés y était aussi extraordinaire. En outre, l'Inde est restée largement couverte de forêts peu exploitées jusqu'en 1850.

Le lion n'a pas occupé en Inde une aire aussi importante que le tigre. Il s'est limité au nord de ce pays. Il n'a pas poursuivi sa course

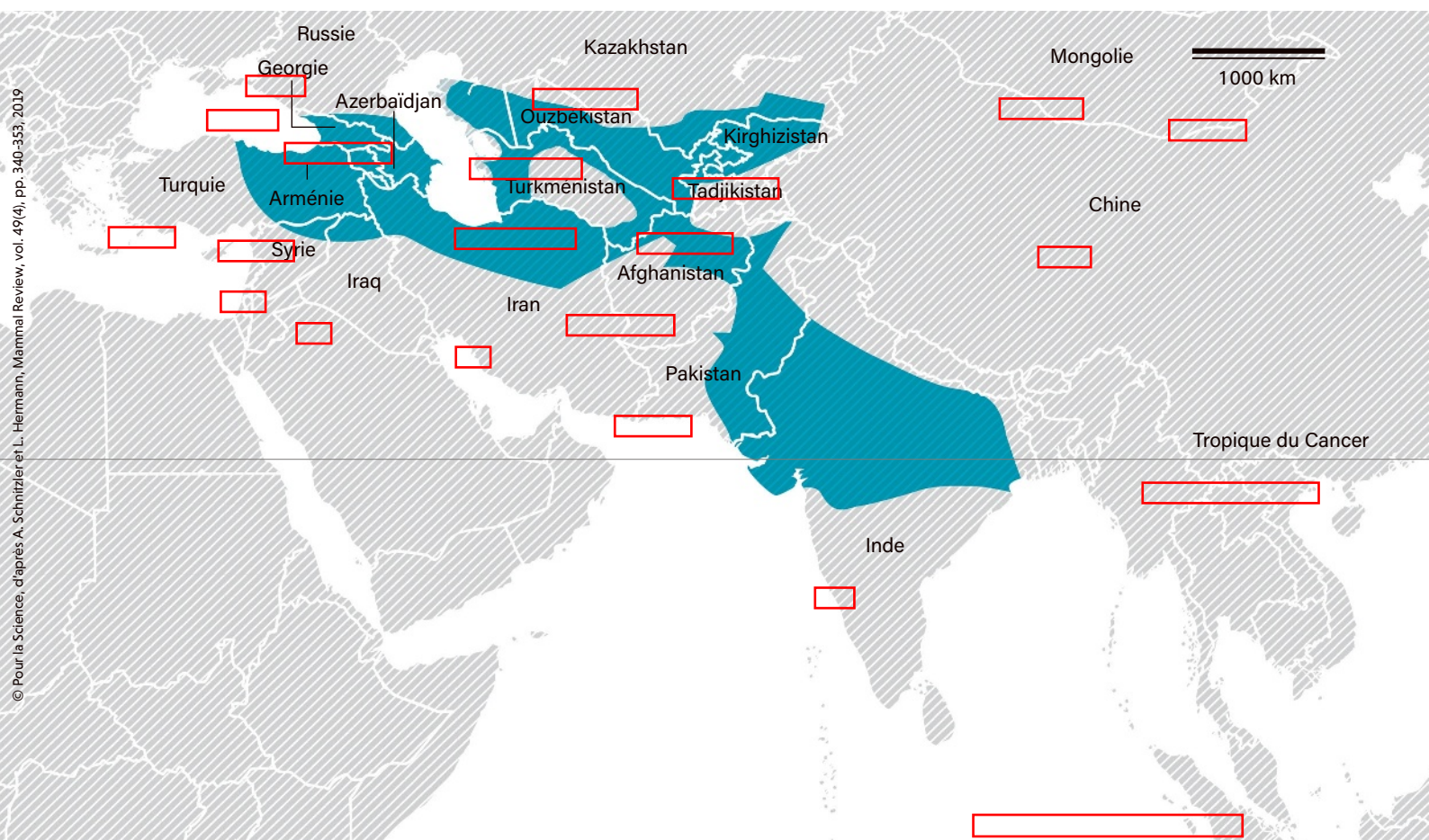
vers la Chine, tout comme le tigre n'a pas colonisé la Turquie occidentale. Dans l'un et l'autre cas, il se peut que les populations, de plus en plus ténues au fur et à mesure qu'elles s'éloignaient de leur centre originel (l'Afrique pour le lion, l'Asie du Sud-Est pour le tigre), aient fini par ne plus pouvoir se renouveler lorsqu'elles s'éteignaient localement sous la pression des compétitions mutuelles, des diminutions temporaires des populations de proies ou des chasses par l'homme.

PARTAGE DES TERRITOIRES ET DES PROIES

Quoi qu'il en soit, on constate qu'en Asie, les aires de répartition du lion et du tigre se recouvraient largement, et cela pendant de longues périodes. Dans quelles conditions cette cohabitation a-t-elle été possible ? On le comprend mieux grâce à des peintures illustrant des scènes de chasse, réalisées par des artistes de la dynastie musulmane moghole en Inde, entre le xvi^e et le $xviii^e$ siècle. On y remarque notamment que le tigre était chassé dans des forêts denses, alors que le lion l'était dans des espaces plus ouverts et probablement plus secs.

Les données éthologiques apportent d'autres renseignements intéressants. Selon de nombreuses observations faites sur le tigre ou le lion, ainsi que sur d'autres prédateurs de moindre taille vivant encore dans les mêmes habitats en Inde ou en Afrique, il apparaît que

La zone colorée en bleu représente les régions potentielles de l'Asie où le lion et le tigre ont cohabité au cours de l'Holocène, c'est-à-dire les 12 000 dernières années.



la coexistence passe par des adaptations des stratégies de chasse adoptées par chacun des prédateurs. Le tigre chasse le plus souvent en solitaire, en embuscade dans une végétation épaisse, tandis que le lion chasse en groupes organisés, et plus souvent le jour. Ces animaux peuvent aussi éviter les conflits en signalant leur présence par des signaux d'avertissement optiques, acoustiques, odorants (phéromones) ou visuels (gratter le sol, marquer les arbres ou les rochers). Et, de façon générale, les populations de prédateurs se régulent entre elles par l'attaque mutuelle de leurs individus faibles (femelles gravides par exemple) ou très jeunes.

Grâce à ces subtils partages des habitats pour la chasse et la reproduction, plusieurs espèces de prédateurs arrivaient ainsi à coexister à l'échelle locale, du moins tant que les proies étaient suffisamment abondantes. On comprend mieux pourquoi c'est en Inde et dans les vastes vallées du Pakistan que se trouvaient les milieux les plus favorables à la coexistence des deux grands félins.

CHASSES DÉVASTATRICES ET DISPARITION DES HABITATS

Bien plus que les contraintes climatiques, c'est l'homme qui est le grand responsable de la quasi-extinction du lion et du tigre dans leur aire commune de répartition. Dès l'âge du Bronze, les massacres de grands mammifères se sont multipliés avec le perfectionnement des armes et des pièges, l'invention du char et plus récemment celle des armes à feu.

Les chasses, dès l'Antiquité, ont été dévastatrices pour le lion, particulièrement prisé pour le symbole de courage et de pouvoir qu'il représentait. Ce félin est aussi plus facile à chasser que le tigre. Diurne, bruyant par ses vocalises, aimant les espaces découverts, il est naturellement plus vulnérable. Les chasses et la destruction d'habitats naturels, due à l'extension des villages, des espaces dévolus aux animaux domestiques et des surfaces cultivées, ont aussi éliminé la plus grande partie des proies qui parcouraient les vastes territoires d'Asie. Privés de nourriture sauvage, les deux grands félins se sont alors attaqués au bétail, ce qui a conduit à des persécutions encore plus accentuées. Lion et tigre se sont alors réfugiés dans des montagnes isolées, d'où ils ont finalement été extirpés.

L'ensemble des études menées sur ces deux fauves a contribué à mieux connaître leur histoire et à mesurer à quel point leurs écosystèmes ont été détruits. L'effondrement de la biodiversité dans cette partie du monde a suscité de nombreux efforts de conservation ou de restauration des milieux naturels. C'est le cas en Inde, État qui ressent l'impérieuse nécessité de réintégrer lion et tigre dans leurs anciens territoires. Aidé de plusieurs associations et



Les lions étaient fréquemment représentés dans les monuments des diverses civilisations asiatiques. En témoignent ces colonnes du temple indien de Bhima Ratha, qui date du VII^e siècle.

BIBLIOGRAPHIE

A. Schmitzler et L. Hermann, **Chronological distribution of the tiger *Panthera tigris* and the Asiatic lion *Panthera leo persica* in their common range in Asia**, *Mammal Review*, vol. 49(4), pp. 340-353, 2019.

D. M. Cooper et al., **Predicted Pleistocene-Holocene range shifts of the tiger (*Panthera tigris*)**, *Diversity and Distributions*, vol. 22, pp. 1199-1211, 2016.

Divyabhanusinh, **Lions, cheetahs, and others in the Mughal landscape**, dans M. Rangarajan et K. Sivaramakrishnan (eds.), *Shifting Ground : People, Animals, and Mobility in India's Environmental History*, Oxford University Press, 2014.

L. Bartosiewicz, **A lion's share of attention : archaeozoology and the historical record**, *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, vol. 60(1), pp. 275-289, 2009.

C. A. Driscoll et al., **Mitochondrial phylogeography illuminates the origin of the extinct Caspian tiger and its relationship to the Amur tiger**, *Plos One*, vol. 4(1), article e4125, 2009.

ONG internationales, ce pays informe, sensibilise et aide les peuples qui coexistent encore avec ces félins, et multiplie les tailles, le nombre et la richesse en proies de ses réserves naturelles.

Ainsi, la population de lions d'Asie s'est accrue de 27% entre 2010 et 2015 dans la péninsule de Gir, en Inde. Elle a atteint 523 individus, grâce à l'augmentation des aires protégées et la protection des proies sauvages. En 2018, des populations satellites de 30 à 40 lions ont été trouvées dans la région. Quant au tigre, l'Inde recèle le plus grand nombre d'individus au monde. Ce félin bénéficie aujourd'hui de 50 réserves indiennes, réparties sur une superficie de plus de 70 000 kilomètres carrés. Selon le rapport *All India Tiger Estimation* publié en 2018 par les autorités indiennes, ces réserves abritaient cette année-là 1 923 tigres, ce qui correspond à environ 65% du nombre total de tigres en Inde.

Quant au reste de l'Asie, qui a définitivement perdu ses populations de lions, peut-être retrouvera-t-il un jour des populations de tigres plus nombreuses. Depuis 2010, le WWF (le Fonds mondial pour la nature) et les gouvernements des treize pays de l'aire de répartition actuelle du tigre s'efforcent de doubler la population de tigres sauvages, dans l'objectif d'atteindre 6 000 individus d'ici à 2022, la prochaine année du Tigre de l'horoscope chinois. Dans la même dynamique, le Kazakhstan se propose de restaurer un habitat riche en proies pour accueillir une centaine de tigres, qui seraient prélevés dans la population des tigres de l'Amour, la plus proche génétiquement de celle des tigres de la Caspienne.

Des espoirs donc, pour préserver encore ce qui peut l'être dans le monde d'aujourd'hui. ■

ON A MENÉ

L'ENQUÊTE

TOUS LES PAPIERS
SE RECYCLENT.

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

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR



Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

L'ESSENTIEL

> Les interfaces cerveau-machine sont des dispositifs qui enregistrent l'activité du cerveau et qui décodent ces signaux pour commander un appareil moteur ou de communication.

> À l'aide d'une telle interface, un patient tétraplégique a pu faire afficher à l'écran des textes qu'il imaginait écrire à la main.

> La vitesse d'écriture atteinte était quasi normale et nettement plus élevée qu'avec des interfaces fondées sur d'autres méthodes.

L'AUTEUR



JÉRÉMIE MATTOUT
chercheur à l'Inserm, membre du Centre de recherche en neurosciences de Lyon (CRNL) où il codirige l'équipe Computation, cognition et neurophysiologie (Cophy).

Écrire par la pensée

Fermez les yeux. Mentalement, imaginez tracer une lettre avec un stylo.

Miracle, elle apparaît sur l'écran. Science-fiction ? Non, la conversion de l'activité cérébrale en lettres affichées vient d'être réalisée à l'aide d'interfaces cerveau-machine. Et testée avec succès sur un patient tétraplégique.

Les occasions d'écrire à l'aide d'un simple stylo sont de plus en plus rares, tant les ordinateurs, téléphones et tablettes sont devenus nos premiers supports d'écriture. En Finlande, en 2016, la décision a même été prise de définitivement délaisser les cahiers pour les claviers, ou du moins de ne plus enseigner l'écriture cursive à l'école. Qu'en conclure, si ce n'est qu'écrire à la main semble désormais relever d'une pratique du passé ?

L'étude publiée dans la revue *Nature* en mai dernier par Francis Willett, de l'université Stanford, en Californie, et ses collègues n'en est que plus intrigante. Ces chercheurs s'enorgueillissent en effet d'avoir pu « lire dans le cerveau » les gestes qu'une personne réalise pour écrire à la main. Autrement dit, ils ont été capables de traduire l'activité des neurones (pas n'importe lesquels, ceux logés dans la partie du cortex qui commande les mouvements fins de notre main dominante) en écriture manuscrite. Le but : permettre à des personnes entièrement paralysées d'écrire en

s'imaginant tracer les lettres à la main. Ce qui suppose, évidemment, qu'elles aient appris à écrire à la main avant leur accident ou la maladie qui les a invalidées !

La clé de cette réussite ? Des progrès notables dans deux nouvelles technologies en plein essor : les interfaces cerveau-machine (ICM) et l'intelligence artificielle (IA).

DES INTERFACES CERVEAU-MACHINE À L'ŒUVRE

Pour bien comprendre l'avancée majeure que constituent ces travaux, il faut revenir sur ce qu'est une ICM. En 1973, un rapport dactylographié de l'ingénieur américain d'origine belge Jacques Vidal mentionnait pour la première fois le terme d'« ICM » et décrivait un programme de recherche que poursuivent aujourd'hui de nombreuses équipes dans le monde, au sein d'universités, mais aussi d'entreprises privées.

Ce programme vise à établir une communication directe entre nos neurones et des ordinateurs. Autrement dit, à permettre un échange d'informations entre notre cerveau



et le monde extérieur, sans avoir recours à nos sens ou à nos moyens d'action (membres et muscles). On imagine sans peine les applications de tels dispositifs, notamment dans le domaine médical, pour redonner, par exemple à des patients souffrant d'un handicap moteur sévère, la capacité de se mouvoir, d'agir sur le monde et de communiquer.

Une ICM se compose de deux éléments principaux: des capteurs qui enregistrent l'activité du cerveau, et un ordinateur qui décode cette activité et commande un appareil qui va la convertir en mouvements ou en messages permettant de communiquer avec l'entourage du patient. Les capteurs sont principalement de deux types: d'une part les capteurs non invasifs, tels que ceux d'électroencéphalographie (EEG), qui mesurent à la surface du crâne les différences de potentiels électriques engendrées par l'activité de larges populations de neurones; d'autre part les capteurs invasifs, qui nécessitent une intervention chirurgicale pour implanter par exemple des microélectrodes mesurant chacune l'activité d'un ou quelques neurones. L'usage de ces derniers est naturellement restreint à certains patients, susceptibles de bénéficier de ces neurotechnologies et ayant donné leur consentement.

À l'inverse des études réalisées en EEG (voir l'encadré page 69), celles qui utilisent des microélectrodes implantées sont nettement plus rares et se concentrent sur le cas d'un ou deux patients tout au plus. Elles laissent toutefois le patient libre de bouger les yeux et permettent une communication plus naturelle, entièrement guidée par le rythme de l'utilisateur. Les signaux enregistrés proviennent de quelques neurones ciblés précisément pour leur implication dans la planification et l'exécution de mouvements. L'enjeu est d'y décoder un ordre moteur, associé à la tentative d'exécution d'un mouvement que le patient n'est plus capable de réaliser.

Très peu de patients – ils sont surtout aux États-Unis – ont ainsi réussi à contrôler un bras robotisé pour se saisir d'un objet et le manipuler. Le niveau de réussite des ICM est encore plus faible pour les tentatives de communiquer avec l'entourage. À ce jour, aucune interface n'a pu directement décoder le contenu du langage en temps réel. En revanche, une équipe de l'université Stanford, dont Francis Willett faisait aussi partie, a mis au point en 2016 une interface permettant au patient paralysé de pointer successivement les lettres de son choix sur un écran pour former des mots. Il parvenait ainsi à écrire une quarantaine de caractères par minute.

Les chercheurs ont fait cette fois le pari de décoder des mouvements nettement plus complexes pour atteindre des performances comparables à celles enregistrées de façon

courante chez des personnes d'environ 65 ans (l'âge du patient ayant reçu l'implant) lorsqu'elles utilisent leur smartphone au quotidien (environ 115 caractères par minute). Et pour cela, paradoxalement, l'équipe a délaissé la stratégie consistant à décoder le geste de pointer vers une position sur l'écran, pour tenter de décoder le geste beaucoup plus complexe de l'écriture manuscrite.

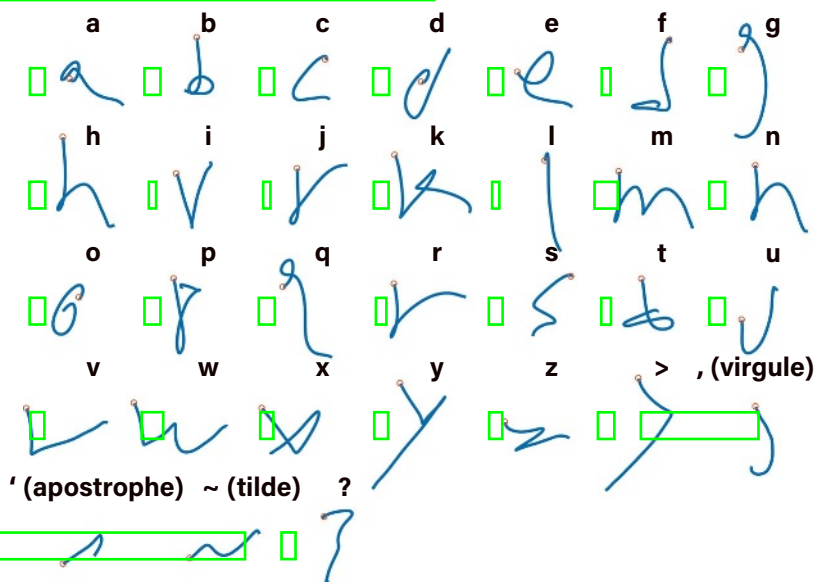
DÉCODER L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE CORRESPONDANT À L'ÉCRITURE MANUSCRITE

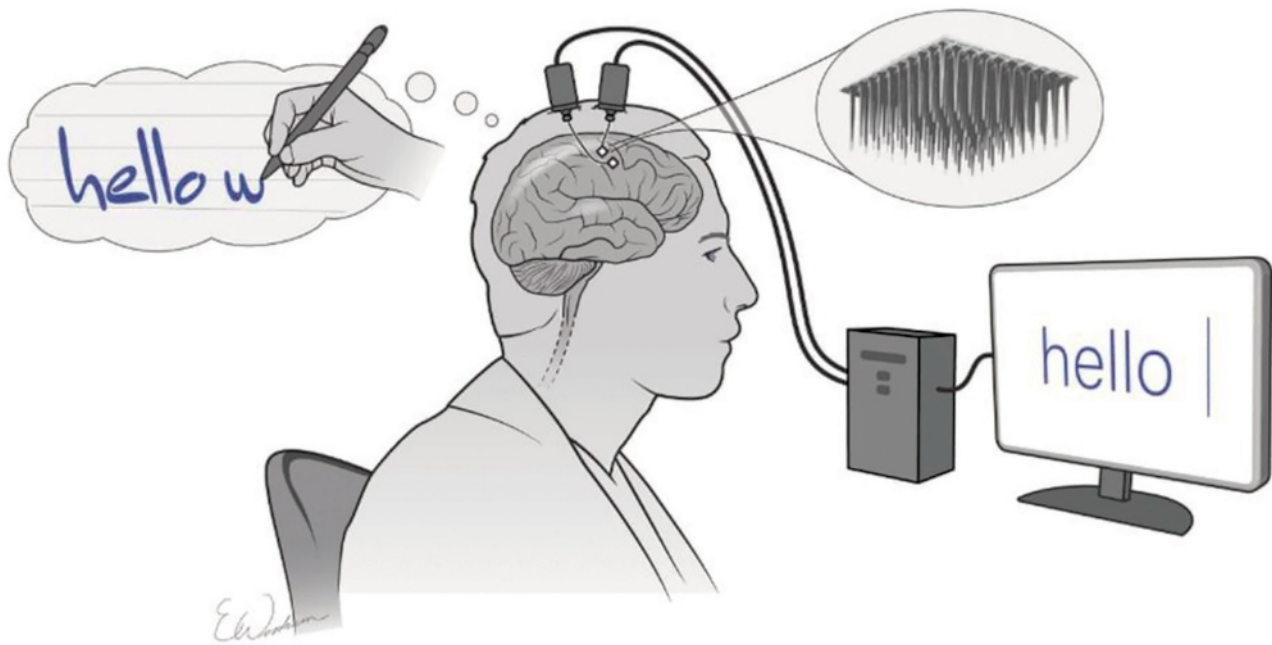
Le but des chercheurs a été de restituer une communication écrite en temps réel chez ce patient, en décodant l'activité d'environ 200 neurones corticaux spécialisés dans le contrôle de la main... Pour ce faire, ils ont procédé par étapes.

Premièrement, au moyen de microélectrodes implantées, ils ont enregistré de manière continue la dynamique des décharges et des silences de chaque neurone pendant que le sujet s'efforçait d'écrire à la main, lettre par lettre, des mots qu'on lui dictait. Il s'agissait toutefois d'une tâche purement mentale, car, paralysé jusqu'au niveau de la nuque, le patient n'était capable que de micromouvements de la main.

Les chercheurs lui ont demandé de tenter d'écrire plusieurs fois un même caractère, et ont recueilli les données neuronales issues de chaque réalisation de chaque caractère. Ensuite, afin d'obtenir une «signature» neuronale pour chaque caractère, les scientifiques ont dû tenir compte du fait que la vitesse d'exécution mentale de chaque lettre pouvait être plus ou moins rapide d'une tentative à l'autre, de sorte que les décharges électriques des neurones pouvaient être plus ou moins espacées dans le temps. Il a ainsi fallu les «recaler»

Chacune de ces lettres a été tracée par l'ordinateur à partir des données captées dans le cerveau du patient en train de s'imaginer les écrire à la main.





temporellement pour révéler le tracé électrique typique de chaque caractère.

La force de cette analyse fondée sur des tracés manuscrits repose sur un fait caractéristique de l'écriture à la main: le stylo suit des courbes, accélère, ralentit, fait demi-tour, revient sur lui-même. Il faut donc s'attendre à ce que le cerveau encode ces paramètres relatifs aux déplacements du stylo imaginaire du patient. C'est effectivement ce qui se produit: l'activité électrique des neurones au cours du temps permet de prédire la trajectoire du stylo imaginaire. Et ça marche: le taux de reconnaissance des lettres atteint 94% de réussite...

Le système d'aide à l'écriture se compose d'une grille de microélectrodes implantées dans l'aire du cerveau qui contrôle les mouvements de la main et d'un algorithme qui convertit l'activité électrique des neurones en tracés de lettres sur l'écran.

quel sera (ou pourra être, du moins) le geste à l'instant $t + 1$ seconde, etc. Le langage est aussi un exemple de flux de données à haute structure temporelle, et les chercheurs se sont d'ailleurs directement inspirés des intelligences artificielles dédiées à la reconnaissance de la parole, qui affichent des taux d'erreur de l'ordre de 5%.

Toutefois, ces algorithmes d'apprentissage profond ne pouvaient pas être appliqués tels quels, pour deux raisons. La première est qu'ils sont généralement entraînés sur un très grand nombre de données, une condition souvent nécessaire pour atteindre de très bonnes performances. Or les données neuronales ne

DÉCODER DES PHRASES EN TEMPS RÉEL

Toutefois, une chose est de décoder l'écriture d'une lettre «hors ligne» (c'est-à-dire à tête reposée, en prenant le temps, et non en temps réel pendant que le patient écrit ses lettres mentalement), à partir de nombreuses données moyennées; une autre est de réaliser ce décodage en temps réel, à partir des données d'une seule réalisation! Pour ce faire, les chercheurs ont entraîné un réseau de neurones artificiels dit «récurrent». On utilise ces réseaux typiquement pour traiter des flux de données présentant une grande structure temporelle, c'est-à-dire des corrélations fortes entre ce qui se passe à un instant donné et ce qui est observé à un instant ultérieur.

La plupart des données comportementales ont une forte structure temporelle: lorsque vous observez la vidéo d'une personne en train d'allumer une cigarette, votre cerveau prédit automatiquement, en observant un geste à l'instant t ,

LES APPROCHES NON INVASIVES POUR LA COMMUNICATION

En électroencéphalographie (EEG), les activités de l'ensemble du cortex se mélangent, notamment du fait de la boîte crânienne qui les diffuse à sa surface. Cela rend particulièrement difficile leur localisation précise.

Par ailleurs, seules les basses fréquences (inférieures à 80 hertz), de haute amplitude et plus synchronisées, sont visibles. En conséquence, décoder une commande fine et complexe telle que l'articulation d'un mot ou la trajectoire d'un mouvement de la main est actuellement hors de portée de l'EEG. Pour restaurer la communication, les interfaces cerveau-machine qui utilisent l'EEG s'appuient donc sur des stratégies de contournement. Typiquement, des lettres sont rapidement flashées à l'écran et c'est l'attention du sujet exclusivement portée vers la lettre cible qui engendrera une réponse cérébrale spécifique, reconnaissable par l'ordinateur. Mais outre le fait que le patient ne peut être autonome pour installer et désinstaller les capteurs EEG, démarrer ou interrompre la communication, ces dispositifs mobilisent fortement l'attention, mais aussi le regard du patient. Les flashes, à la longue, fatiguent les yeux et une calibration des algorithmes de décodage reste de mise avant chaque utilisation. Enfin, ils atteignent typiquement des rythmes de communication de quelques caractères par minute. Le record est certes de l'ordre de 60 caractères par minute, mais il est obtenu en laboratoire chez de jeunes volontaires sains, sachant qu'une personne âgée d'une soixantaine d'années tape sur un clavier à la vitesse d'environ 115 caractères par minute.

peuvent pas être acquises dans les mêmes proportions que des échantillons de paroles, loin de là. La deuxième raison est liée au fait que dans le cas d'une écriture où le patient est laissé relativement libre, il est impossible de savoir quand débute et quand s'achève l'écriture d'une lettre donnée.

Rarement patient a aussi bien porté ce qualificatif ! Celui-ci s'est prêté à 3 jours d'enregistrements de données d'entraînement pour l'algorithme, avant d'entamer, sur 5 jours consécutifs, les séances de test du système en temps réel. Et chaque séance débutait par l'acquisition de données complémentaires afin d'entraîner l'algorithme de manière plus spécifique à la séance du jour. Cela a constitué une base de données de plus de sept heures et demie d'enregistrements, soit 572 phrases de plus de 30 000 caractères au total.

En temps réel, l'algorithme évalue à chaque instant la probabilité, pour chaque symbole de l'alphabet, d'être le caractère écrit. Lorsque l'une des probabilités franchit un seuil significatif, ce symbole est choisi et produit à l'écran.

JUSQU'À 90 CARACTÈRES PAR MINUTE

La vidéo a été mise en ligne par les chercheurs sur le site de *Nature*. Elle montre le même patient à cinq ans d'intervalle. Sur la partie basse de l'écran, il utilise l'interface en temps réel pour déplacer un curseur à l'écran et appuyer sur les touches d'un clavier virtuel. Sur la partie haute, il utilise la nouvelle interface pour écrire la même phrase qui s'affiche petit à petit, suite au décodage en temps réel de son écriture manuscrite. La deuxième approche est nettement plus rapide. En moyenne, le patient atteint une vitesse pouvant aller jusqu'à 90 caractères par minute.

De surcroît, les chercheurs ont réalisé une série d'expériences et analyses complémentaires qui suggèrent que le décodage de l'écriture manuscrite, pourtant au premier abord plus difficile, se révèle plus efficace, justement parce que les mouvements associés sont plus complexes et que leurs signatures neuronales sont ainsi plus spécifiques et mieux différenciables les unes des autres, notamment dans leur dynamique. En effet, les mouvements que fait votre main quand vous dessinez un *d* ou un *f* sont bien plus distincts que ceux que vous réalisez pour appuyer sur la touche *d* ou *f* de votre clavier d'ordinateur...

Ainsi, contre toute attente, c'est le décodage de l'écriture manuscrite qui permet d'atteindre les meilleures performances de communication par ICM. Mais pour totalement appréhender la portée de ces résultats, il faut aussi en souligner les limites, ce que n'ont globalement pas manqué de faire les auteurs des travaux eux-mêmes.

Contre toute attente, c'est le décodage de l'écriture manuscrite – et non sur clavier – qui permet d'atteindre les meilleures performances de communication par interface cerveau-machine

Cette étude à partir d'un seul patient soigneusement sélectionné n'est bien sûr qu'une première démonstration, mais une démonstration irréfutable de la faisabilité de ce type d'interaction, même neuf ans après l'accident qui a causé son handicap sévère. Par ailleurs, si les microélectrodes utilisées ont déjà montré leur robustesse, parfois jusqu'à trois ans après leur implantation, développer des implants sûrs, durables, miniaturisés, souples et permettant d'enregistrer un maximum de neurones reste un défi majeur. Une autre solution prometteuse est d'ailleurs celle de l'électrocorticographie (ECoG), moins invasive, qui consiste à poser une grille d'électrodes à la surface du cortex, au moyen d'une chirurgie moins lourde.

Enfin, il est important de rappeler que les patients tétraplégiques ont une capacité de parole très largement préservée, généralement suffisante pour commander une synthèse vocale et leur permettre d'écrire. Autrement dit, le patient implanté dans cette étude ne représente pas la population des principaux bénéficiaires de ce type d'interface, à savoir les personnes en état d'enfermement, à la suite d'un accident du tronc cérébral ou à un stade avancé d'une sclérose latérale amyotrophique (SLA). Il reste donc à démontrer que ces patients, complètement paralysés ou presque, pourraient contrôler une telle interface. Les études menées auprès de ces patients avec de précédentes interfaces incitent à la prudence... ■

BIBLIOGRAPHIE

F. R. Willett et al.,
**High-performance
brain-to-text
communication
via handwriting**,
Nature, vol. 593,
pp. 249-254, 2021.

C. Pandarinath et al.,
**High performance
communication by people
with paralysis using
an intracortical brain-
computer interface**,
eLife, vol. 6,
article e18554, 2017.

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT!**



RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,40 €.**

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

1^{re} réf. x 10,40 € = €
 2^e réf. x 10,40 € = €
 3^e réf. x 10,40 € = €
 4^e réf. x 10,40 € = €
 5^e réf. x 10,40 € = €
 6^e réf. x 10,40 € = €

TOTAL À RÉGLER €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Téléphone :

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science en nous retournant ce bulletin complété

Offre valable jusqu'au 31/12/21 en France Métropolitaine.
Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

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



Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr

L'ESSENTIEL

→ Les Occidentaux n'ont découvert l'existence des grands singes qu'à partir du XVIII^e siècle.

> Au XIX^e siècle, si des récits de voyage au Gabon suggéraient l'existence d'un singe africain plus grand que le chimpanzé, la preuve de l'existence du gorille ne fut fournie qu'en 1847, grâce à des ossements.

> Les récits et l'imaginaire qui entouraient ce mystérieux

animal avaient déjà donné, depuis plusieurs décennies, l'idée tenace d'un monstre féroce et violent, très éloignée de son comportement en milieu naturel.

> Pendant des décennies, cette idée a déformé la perception de cet animal, et probablement de l'ethnie fang qui, au Gabon, désignait le gorille sous le nom de *ngil* et lui vouait un culte particulier.

L'AUTEUR



CÉDRIC CRÉMIÈRE
historien des sciences et muséologue, chercheur associé à l'Institut d'histoire moderne et contemporaine (CNRS, ENS, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne), à Paris

Gare au gorille!

Entre fantasmes, politique et débats sur la classification des grands singes, l'histoire de la découverte du gorille, au XIX^e siècle, montre à quel point les dimensions naturelle et culturelle sont imbriquées dans l'élaboration de la science.

Les musées sont une source inépuisable de surprises. En 2010, le Muséum d'histoire naturelle du Havre, dont j'étais alors le directeur, ferma quelques mois, le temps de sa rénovation. Lors de la préparation au déménagement des collections, avec mes collègues, nous y avons fait une curieuse découverte : un mystérieux masque africain classé parmi les collections asiatiques.

Les seules informations sur ce masque en bois se résumaient à l'inscription à l'encre presque effacée de l'étiquette qui l'accompagnait : « Masque pahouin de féticheur à l'apparition duquel les femmes pahouines doivent se réfugier dans leur case sous peine d'être mises à mort, rapporté d'un village pahouin de la rivière Dhemboë (Gabon) par M. Millot, en 1894. »

Après des recherches dans les archives et catalogues conservés au musée, nous avons identifié l'objet. Les Pahouins sont les Fangs, une ethnie qui, à l'époque, se trouvait principalement entre les actuels Gabon, Guinée équatoriale et Cameroun. Et avec son visage étiré, ses yeux mi-clos et sa bouche non évidée,

le masque est typique du Ngil, une société secrète et justicière des Fangs peu connue, car interdite par les autorités coloniales dès 1910.

Le chef de cette société secrète débusquait et punissait les sorciers et les criminels. Il possédait tous les droits pour découvrir la vérité et rétablir l'ordre, notamment celui de torturer, voire de tuer les suspects, ce qui a longtemps valu aux Fangs une réputation de cannibalisme.

Les archives ont en revanche fourni peu d'informations sur les circonstances de l'arrivée du masque au musée. On sait juste que, collecté en 1894 par un certain M. Millot, il est entré dans les collections en 1902 et est l'un des rares masques de cette société secrète conservés dans des musées occidentaux. Un autre point m'intriguait : *ngil* signifie « gorille » en langue fang. L'arrivée du masque dans un muséum d'histoire naturelle était-elle liée au mystère qui, à l'époque, entourait cet animal dans le monde occidental ? C'est ainsi que je me suis retrouvé à explorer l'histoire de la découverte de ce primate.

Et de fait, en se plongeant dans cette histoire, on s'aperçoit qu'elle est indissociable de

Ce masque africain dit « du Ngil », rapporté d'un village du Gabon au XIX^e siècle, a curieusement été retrouvé dans les collections asiatiques du Muséum d'histoire naturelle du Havre en 2010. Plus petit que les autres masques de ce type, il n'a peut-être jamais été utilisé. On ignore s'il est inachevé (il est dépourvu de bouche) ou s'il a été réalisé pour son premier propriétaire, un certain M. Millot.



BIOGRAPHIE

Cédric Crémère

est historien des sciences et muséologue, chercheur associé à l'Institut d'histoire moderne et contemporaine (CNRS, ENS, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne), à Paris. Il a dirigé le Muséum d'histoire naturelle du Havre de 2005 à 2019.

celle des cultures exotiques. Le mystère autour du gorille a nourri à la fois la science et la culture et, inversement, récits imaginaires et croyances ont contribué à entourer cette histoire de mystère...

UN SINGE AFRICAIN PLUS GRAND QUE LE CHIMPANZÉ?

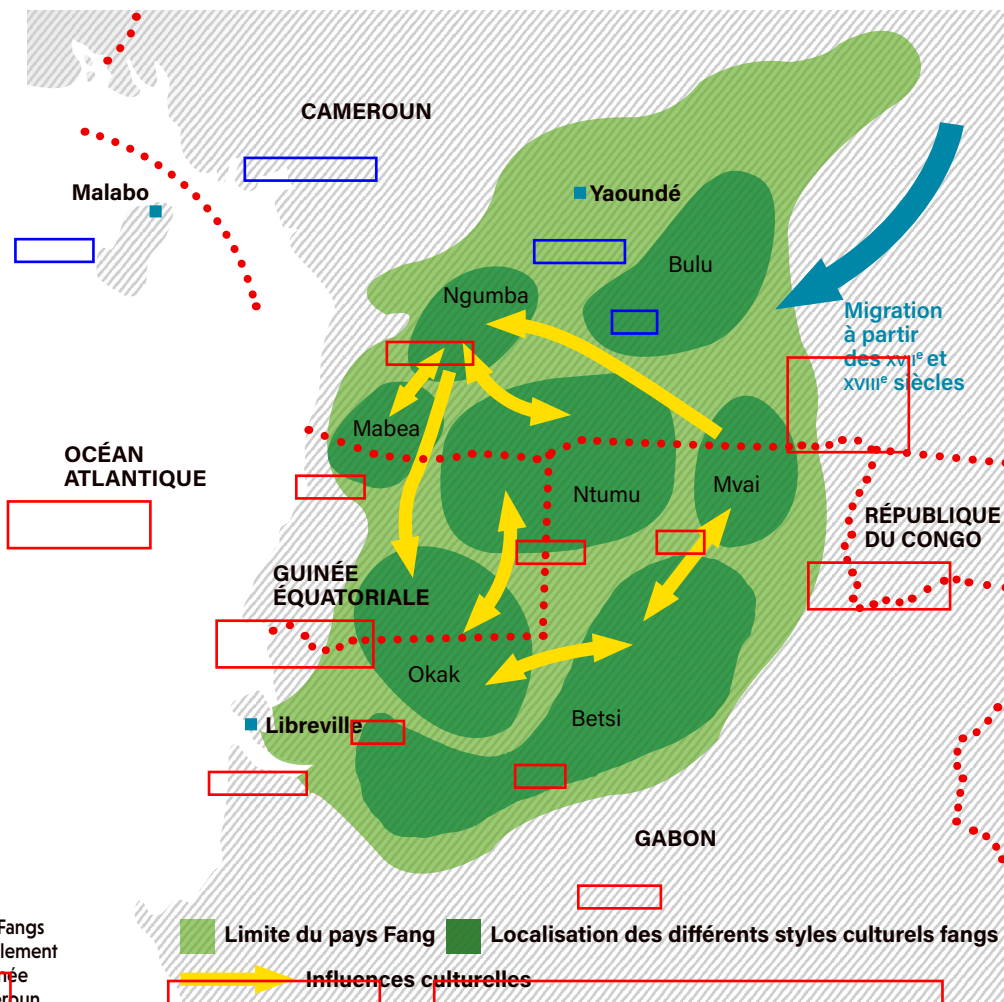
Les Occidentaux n'ont découvert l'existence des grands singes qu'assez tardivement. L'orang-outan fut le premier observé et étudié, en Asie au début du XVII^e siècle, sous le nom de «pongo». Ses restes squelettiques et ses peaux ont rapidement garni les cabinets d'histoire naturelle. Puis est venu le tour du chimpanzé, décrit au XVII^e siècle en Afrique sous le nom de «jocko». La rencontre avec le gorille n'a eu lieu qu'au siècle suivant.

De fait, au XVII^e siècle, le continent africain était encore peu exploré. Certes, en 1638, l'humaniste néerlandais Olfert Dapper a relaté, dans sa *Description de l'Afrique*, l'existence sur ce continent d'animaux qui ressemblaient à des grands singes: «Une espèce de Satyre que les Negres appellent Quojas-Morrou & les

Portugais, Salvage. Ils ont la tête grosse, le corps gros & pesant, les bras nerveux, ils n'ont point de queue & marchent tantôt tout droit & tantôt à quatre pieds. Ces animaux se nourrissent de fruits & de miel sauvage & se battent à tout moment les uns contre les autres. Ils sont issus des hommes, à ce que disent les Negres, mais ils sont devenus ainsi demi-bêtes en se tenant toujours dans les forêts. On dit qu'ils forcent les femmes & les filles, & qu'ils ont le courage d'attaquer des hommes armés.»

Mais il est peu probable qu'il se soit agi d'un gorille: Olfert Dapper ne semble pas avoir mis les pieds en Afrique et, en l'absence d'autres témoignages similaires de l'époque, il est plus probable qu'il se soit référé à l'orang-outan, même si la géographie ne coïncide pas.

Avec la description des premiers grands singes, la question de leur classification s'est assez vite posée. En 1766, dans le quatorzième tome de son *Histoire naturelle*, le naturaliste français Georges Louis Leclerc, comte de Buffon, évoqua longuement «son» jocko et fit le bilan des connaissances sur les singes. Se distinguant du Suédois Carl von Linné, qui,



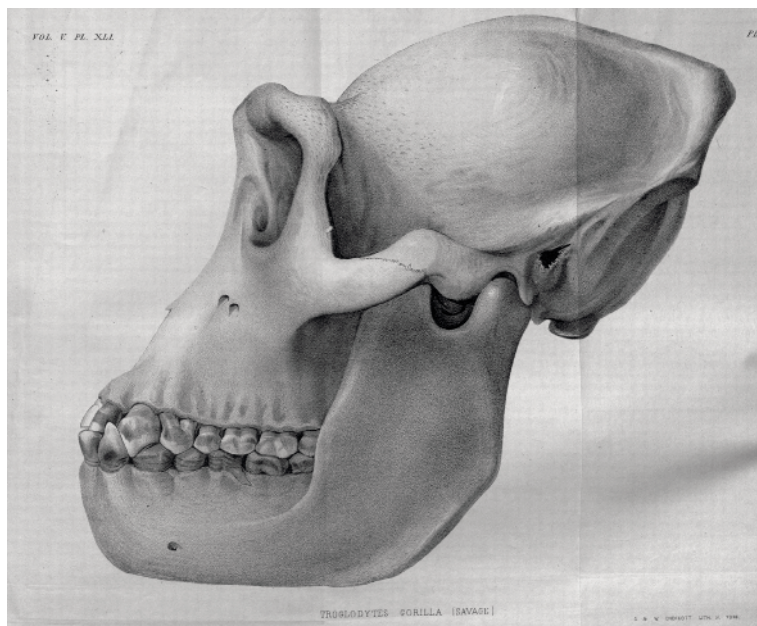
en 1758, dans la dixième édition de son *Systema naturae*, plaçait l'homme au plus près des grands singes dans le groupe des primates, Buffon éloigna le singe de l'homme, qu'il pensait à bien des égards plus proche du cheval, par exemple.

Pour lui, il ne fallait pas fonder la comparaison uniquement sur des caractères anatomiques: «Ainsi ce singe [le chimpanzé], que les Philosophes, avec le vulgaire, ont regardé comme un être difficile à définir, dont la nature étoit au moins équivoque & moyenne entre celle de l'homme & celle des animaux, n'est dans la vérité qu'un pur animal, portant à l'extérieur un masque de figure humaine, mais dénué à l'intérieur de la pensée et de tout ce qui fait l'homme [...].»

Mais c'était compter sans la fascination qu'exerçaient les grands singes et le mystère grandissant qui, depuis la publication du livre de Dapper, entourait l'existence d'un orang-outan ou pongo africain plus grand que le chimpanzé. Certes, on ne donnait plus de crédit scientifique aux simples récits: ces derniers devaient s'accompagner d'observations, de dessins, d'objets, bref d'autant d'éléments permettant de constituer une preuve de l'existence d'une nouvelle espèce. Mais nombre de terres étaient encore inexplorées et fertilisaient les fantasmes. Notamment, on prêtait aux grands singes le goût pour les femmes, qu'ils auraient enlevées, et la violence, exercée sur les hommes.

En effet, jusqu'au XIX^e siècle, on ne fréquentait essentiellement en Afrique que ses côtes pour les besoins du commerce. Les compagnies commerciales y avaient des habitudes depuis plusieurs siècles. Le Gabon, petit pays à l'échelle de son continent, était connu des Occidentaux pour son Fort d'Aumale, aujourd'hui Libreville: des baraquements, une présence militaire «légère» et un point de départ vers les factoreries – des commerces en pleine brousse où l'on trouvait de tout, notamment les ressources de la forêt. Bref, un endroit où l'on «trafiquait».

Au début du XIX^e siècle, avec le développement du commerce, des incursions de plus en



Le premier crâne de femelle gorille décrit par deux Occidentaux, le missionnaire et naturaliste américain Thomas Staughton Savage et le médecin et anatomiste américain Jeffries Wyman, en 1847.

plus profondes eurent lieu au-delà des côtes. Les voyageurs qui tentaient d'explorer plus avant l'intérieur des terres, cependant, étaient contraints par la végétation, le climat et la langue, et parfois l'hostilité des populations locales. C'est dans ce contexte qu'en 1817, l'Anglais Thomas Bowdich se lança à la recherche d'un grand singe africain que les indigènes locaux appelaient alors *ingena*.

LA LÉGENDE DE L'« INGENA »

Nommé secrétaire de la compagnie des commerçants d'Afrique, Thomas Bowdich voyagea plusieurs mois au Gabon cette année-là afin d'affirmer le contrôle de la région par les Britanniques. Glanées sur son chemin, des légendes locales rapportaient que l'*ingena* construisait des huttes de fortune, dormait sur leur toit et tenait encore ses petits dans les bras, même quand ces derniers étaient morts.

L'*ingena* intriguait, et la communauté naturaliste mondiale s'intéressait à cette hypothèse d'un orang-outan africain, mais Bowdich n'observa aucun *ingena* ni n'en rapporta de restes. Néanmoins, dans le récit de sa mission publié deux ans plus tard, il évoqua l'animal comme s'il l'avait rencontré: «Il y a de curieuses variétés de singes. Le sujet favori de nos conversations naturalistes, et le plus extraordinaire, était l'*Ingena*, comparé à l'Orang-Outan, mais bien plus grand en taille, généralement haut de cinq pieds [1,90 mètre] et quatre à hauteur des épaules.» Bowdich assura aussi qu'il était courant d'en voir dans la région de Kaylee et que les *ingena* tendaient des embuscades aux voyageurs pour les attaquer.

Les naturalistes s'intéressaient à l'hypothèse d'un orang-outan africain

Il fallut attendre trente ans avant les découvertes d'ossements de l'animal. En 1836, un premier indice avait bien créé l'émotion parmi les naturalistes. Un certain capitaine Thouret avait envoyé d'Afrique une peau de grand singe au Muséum du Havre (encore lui!), comme le raconta le naturaliste Isidore Geoffroy Saint-Hilaire, professeur au Muséum d'histoire naturelle de Paris. Mais celle-ci était arrivée incomplète – la peau des extrémités et de la tête manquait – et trop abîmée pour en tirer quoi que ce soit. On ne sait si cette peau fut détruite lors des bombardements du Havre en 1944 ou avant, à cause de sa préparation médiocre, mais elle disparut des registres du Muséum du Havre en 1852. Un indice supplémentaire de l'existence du gorille, donc, mais pas une preuve.

Ce sont un missionnaire américain et sa femme, Jane et John Leighton Wilson, qui, les

premiers, ont décrit des ossements inconnus au milieu du XIX^e siècle. Le Gabon était devenu un espace de commerce où cohabitaient Anglais, Français, Portugais et Américains, ces derniers représentés par des missionnaires. Les installations avaient perduré et le commerce s'était intensifié: on y vendait des esclaves, du caoutchouc naturel, des ivoires d'éléphant et d'hippopotame, de l'ébène et d'autres bois, etc.

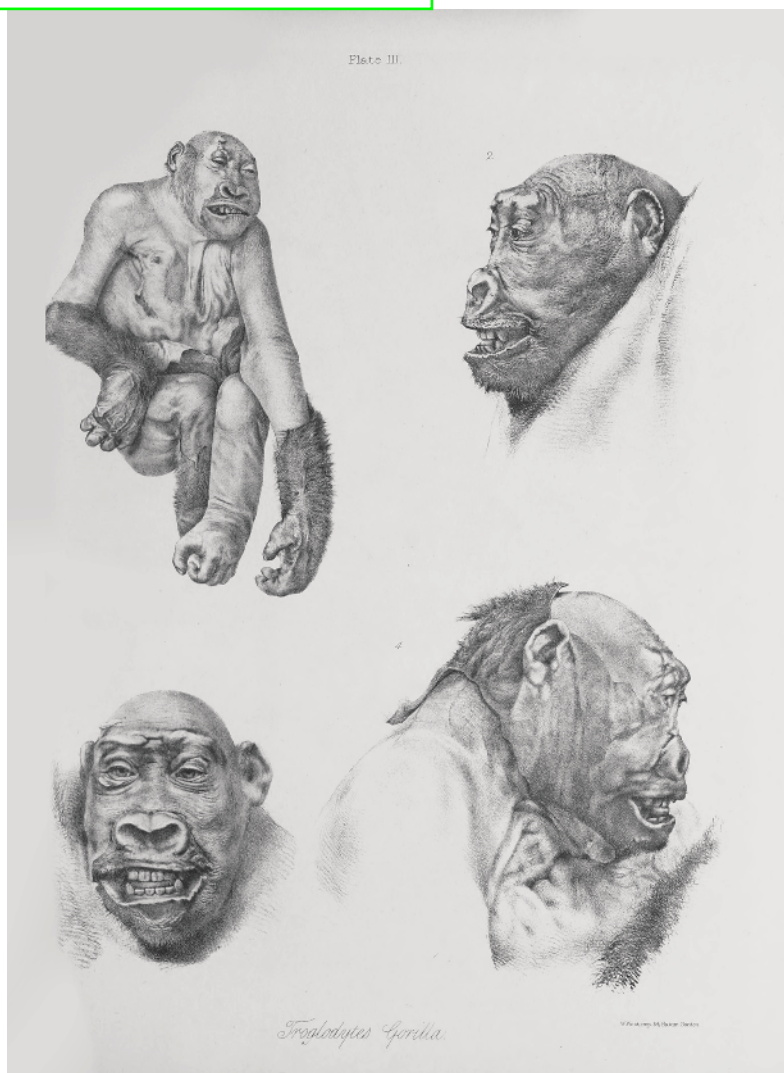
La forêt tropicale restait peu pénétrable sinon par les voies d'eau difficilement navigables. Le climat était hostile, les fièvres redoutables. Du fait de ces difficultés et d'intérêts essentiellement commerciaux, le cœur de l'Afrique équatoriale restait encore peu exploré. C'est dans ce contexte qu'en 1842, les époux Wilson ont fondé la mission de Baraka, en pays Mpongwe, près de l'actuelle Libreville. Le missionnaire américain s'intéressait aux langues, aux coutumes, à l'histoire de l'Afrique et à l'histoire naturelle. S'il ne se revendiquait pas naturaliste, il était excellent observateur. Il constata sur «un crâne qui semble être objet de craintes pour les populations locales» une crête sagittale très prononcée qui ne ressemblait à rien de ce qu'il connaissait.

À partir d'avril 1847, les Wilson accueillirent un autre missionnaire américain, le naturaliste Thomas Staughton Savage, en transit forcé au Gabon entre le Cap des Palmes (aujourd'hui le Liberia) et les États-Unis. Savage s'intéressait depuis longtemps aux chimpanzés et connaissait bien les caractères anatomiques des singes. Aussi le crâne que Wilson lui montra excita-t-il sa curiosité. Savage partit plusieurs fois en expédition pour tenter de voir, vivant ou mort, ce que Wilson avait appelé «gorille» en référence au récit du navigateur carthaginois Hannon, qui, durant un long périple visant à coloniser les côtes de l'Afrique occidentale commencé il y a environ 500 ans avant notre ère, avait nommé en grec «gorilla» un peuple velu rencontré sur son chemin (probablement des chimpanzés).

DES OSSEMENTS INCONNUS

Savage ne vit aucun gorille, mais rapporta, grâce à Wilson et à son implantation locale, plusieurs ossements permettant d'affirmer que ce crâne spectaculaire trouvé par Wilson était bien une nouvelle espèce de grand singe. Le 24 avril 1847, Savage écrivit du Gabon au naturaliste britannique Richard Owen, assistant du conservateur du Collège royal de chirurgie d'Angleterre, à Londres, car il souhaitait comparer les éléments en sa possession avec le squelette d'orang-outan se trouvant à Londres.

Déplorant par ailleurs ne pas avoir de contact à Paris, Savage s'adressa aussi à Jeffries Wyman, à Boston, qui avait étudié à Paris auprès du naturaliste Georges Cuvier et à Londres auprès d'Owen. Médecin et



Dans son *Mémoire sur le gorille* (1865), le naturaliste britannique Richard Owen rassemble les études qu'il avait menées sur différents spécimens depuis près de vingt ans, comme ce jeune mâle transporté du Gabon jusqu'au British Museum dans un tonneau rempli d'alcool et représenté d'après des photographies prises à son arrivée. Le gorille avait perdu une partie de ses poils et de sa peau.



Dans un des récits de ses *Explorations et aventures en Afrique équatoriale* (1863), l'explorateur français Paul Belloni Du Chaillu raconte avec verve comment, lors d'une chasse au gorille, un imposant mâle attaqua l'un de ses compagnons, le laissant pour mort.

L'enjeu était de décider si les grands singes étaient proches de l'homme

anatomiste, Wyman était un membre actif de la société d'histoire naturelle de Boston. Les deux hommes sympathisèrent et c'est devant cette assemblée qu'en août 1847, avant le retour de Savage aux États-Unis, Wyman annonça en leurs deux noms la découverte d'une nouvelle espèce de grand singe : l'*ingena* devint *Troglodytes gorilla*.

De retour à Boston, Savage poursuivit son travail avec Wyman. Les deux hommes mobilisèrent les collections à leur disposition – deux squelettes de chimpanzés qui se trouvaient dans le Cabinet de la société d'histoire naturelle de Boston, deux présents chez le naturaliste John Collins Warren, deux autres encore à l'Académie de sciences naturelles de Philadelphie, et enfin un en possession de Savage – afin de les comparer aux ossements de gorille rapportés par Savage (deux crânes mâles, deux crânes femelles, deux pelvis mâle et femelle, des os longs supérieurs et inférieurs et quelques vertèbres et côtes). Ces collections ont à ce jour presque entièrement disparu, probablement à l'occasion du déménagement des collections de la société d'histoire naturelle de Boston vers le musée de l'université Harvard, qui conserve encore l'un des crânes de Savage.

Il s'agissait de clarifier la position de l'animal au sein de la classification du vivant. Les naturalistes voulaient aussi s'assurer qu'il appartenait bien à une nouvelle espèce et, le cas échéant, nommer l'animal correctement selon sa place dans la classification. À Londres, cependant, Owen restait à l'affût. Le 22 février 1848, il publia un article en donnant un nouveau nom à l'animal : *Troglodytes savagei*, en hommage à son découvreur. On peut imaginer qu'Owen l'a renommé pour apporter sa pierre à l'édifice d'une découverte très importante pour l'époque.

Durant la décennie suivante, Owen mobilisa ses réseaux pour étudier davantage de spécimens. Des marins anglais passèrent le message et, bientôt, les restes de gorilles se mirent à affluer vers ses collections.

Au Muséum de Paris, Henri de Blainville, successeur de Cuvier à la chaire d'anatomie comparée, décrivit à son tour le gorille dans son *Ostéographie* en avril 1849, peu avant sa mort, grâce à un spécimen reçu d'un chirurgien. À cause d'une probable coquille ou erreur de typographie, « gorilla » devint « gesilla » à l'impression. Le gorille devint alors le *Pithecus gesilla*, d'après le terme « pithèque », utilisé dans l'Antiquité grecque et érigé en groupe pour la classification des orangs-outans par le naturaliste français Étienne Geoffroy Saint-Hilaire quelques années plus tôt.

De fait, ces débats sur la manière de nommer (la taxonomie), vifs en France à l'Académie des sciences en 1853, dépassaient une simple question de vocabulaire et de regroupement. Le véritable enjeu était de décider si l'on allait placer les grands singes (chimpanzé, orang-outan, gorille) à proximité ou non de l'homme.

« FÉROCITÉ, FORCE ET RUSE »

Dans le même temps, on ne savait rien de l'habitat et des mœurs de ce nouvel animal que l'on décrivait depuis les États-Unis et l'Europe. On restait avec un animal fantasmé, assez bien résumé par le propos de Paul Belloni Du Chaillu : « férocité, force et ruse ». Du Chaillu, un Français natif de la Réunion qui devint américain, fut l'un des premiers à explorer les forêts du Gabon et à en décrire les curiosités, lors de ses voyages à partir de 1855.

L'explorateur ne cacha pas son étonnement à la vue de ces êtres velus qui se tenaient debout, poussaient des hurlements caractéristiques et que l'on nommait les « hommes des bois ». Il se vanta d'être le premier à observer le gorille vivant, à le chasser et à le capturer. D'un physique résistant, habile avec les langues et d'un contact aisé avec les populations locales, il explora ardemment le cœur de la forêt gabonaise et rendit compte de ses chasses et de ses rencontres avec les Fangs, groupe ethnique tout aussi fantasmé que le gorille.

Peuple intrigant, que l'on disait guerrier et cannibale, les Fangs (appelés aussi «Pahouins» ou «Paouens») étaient présents dans ce qui est aujourd'hui une partie du Gabon, du Cameroun et de la Guinée équatoriale, et, dans une moindre mesure, dans les Républiques centrafricaine et du Congo, ainsi qu'à São Tomé-et-Príncipe. Ils abandonnaient leurs villages pour s'installer toujours plus à l'ouest, permettant le renouvellement des cultures, notamment de la banane. Ce nomadisme était appelé en langue fang *mfa'a ya mañ*.

Dans le récit de ses voyages, intitulé *Voyages et aventures dans l'Afrique équatoriale* (1863), Du Chaillu décrit les Fangs aux peaux d'un noir plus clair, souvent enduites de poudre de bois rouge, aux yeux pouvant être bleu-vert. Les Fangs avaient tout pour intriguer. Dans la partie nord et est du Gabon, ils étaient les maîtres de la forêt. Et c'est avec eux que Du Chaillu chassa et tua son premier gorille, en 1856: «C'est une apparition que je n'oublierai jamais. Il paraissait avoir près de six pieds, son corps était immense, sa poitrine monstrueuse, ses bras d'une incroyable énergie musculaire. Ses grands yeux gris et enfoncés brillaient d'un éclat sauvage, et sa face avait une expression diabolique. Tel apparut devant nous ce roi des forêts d'Afrique.»

Du Chaillu fut le premier occidental à voir un gorille dans son milieu naturel et à en tuer un. Il poursuivit ses chasses et ses études. Les spécimens qu'il envoya au British Museum de Londres permirent à Owen d'en apprécier la qualité en 1861 et de poursuivre ses travaux. L'animal féroce et rusé qui s'était installé dans les esprits des voyageurs d'Afrique gagna ainsi progressivement la curiosité publique, piquée depuis l'arrivée, en 1855 à Londres, de la première femelle gorille vivante.

Le gorille prit alors une nouvelle dimension culturelle à travers les histoires indigènes que rapporta Du Chaillu: il pouvait être le réceptacle de l'esprit d'un homme; le gorille mâle enlevait les femmes; il était arrivé qu'un homme se transforme en gorille... Du Chaillu mesurait l'importance de l'animal pour les Fangs à l'espace qui lui était laissé dans le monde des esprits: «Le temple de l'idole est le plus souvent couronné par des crânes de bêtes féroces, parmi lesquels le plus apparent est celui du gorille.»

Les récits et exploits de Du Chaillu ont été controversés à son époque. On imagine son éditeur aux États-Unis lui demandant d'enjoliver certains de ces faits d'armes pour faire sensation. Il est intéressant de voir comment un animal certes impressionnant par sa taille et ses effets démonstratifs, mais herbivore, plutôt discret et fuyard, est décrit comme un monstre de violence.

Le gorille se fit une place au-delà des cercles savants et en 1863, Napoléon III en offrit un spécimen dans de l'alcool au médecin Louis Auzoux, qui le disséqua et en fit un modèle en papier mâché grandeur nature, démontable.

L'ANIMAL LE PLUS PROCHE DE L'HOMME?

La même année, Thomas Huxley, soutien inconditionnel de Darwin, dont *L'Origine des espèces* avait paru en 1859, publia *La Place de l'homme dans la nature*, plaidoyer pour une proximité filiale de l'homme avec les grands singes et particulièrement le gorille, «le singe qui s'approche le plus de l'homme, dans la totalité de son organisation».

Toujours en 1863, Geoffroy Saint-Hilaire, professeur du Muséum de Paris, eut le dernier mot en termes de nomenclature en modifiant le nom de genre et en adaptant le nom que Wilson lui avait donné. Le gorille devint *Gorilla gina* en référence à *ingena*. Owen avait perdu la bataille de la nomenclature, mais en 1865, dans son *Mémoire sur le gorille*, il dressa le bilan des recherches réalisées pendant deux décennies en appuyant sa démonstration sur les spécimens rapportés, disséqués, décrits et dessinés.

Nul doute que les discussions vives quant à la proximité du gorille avec l'homme ont aiguisé l'intérêt pour l'animal. Dès sa publication de 1847 avec Wyman, Savage s'était voulu catégorique sur un point: «N'importe quel anatomiste qui se risquerait à comparer les squelettes de Nègres et d'Orang se trouvera infailliblement coïncé par l'écart important qui les sépare.» En effet, des discussions portaient sur la proximité des «Nègres» avec les grands singes. Mais avec le temps, l'idée d'une proximité anatomique des grands singes et de l'homme s'était dessinée, teintée d'un certain gradualisme recherchant la différence entre l'homme et l'animal.



Un rituel ngil sur une photographie issue du livre *Les Pangwe* (1913), de l'ethnologue allemand Günter Tessmann.

Au cours de l'année 1869, des débats agitaient encore la société d'anthropologie de Paris à ce sujet. L'ouvrage de Darwin *La Descendance de l'homme et la Sélection sexuelle*, publié en 1871 avec une première traduction en français en 1872, apporta un nouvel argument en faveur de la proximité de l'homme et des grands singes en intégrant la dimension du temps long et de la transformation des espèces. Le gorille fut ainsi longtemps considéré comme ce proche lointain mêlant attraction et répulsion. Ce n'est que bien plus tardivement, en 2005, que le séquençage du génome du gorille l'a détrôné comme animal le plus proche de l'humain au profit du chimpanzé.

LE NGIL, UNE OMBRE FANTASMÉE?

À la fin du XIX^e siècle, si le gorille ne paraissait plus aussi mystérieux qu'au début du siècle, l'imaginaire qui l'entourait ne s'est pas tari pour autant, et a trouvé des réminiscences grâce au Ngil – «gorille» en langue Fang. Les récits exaltés des quinze années de mission du père Henri Trilles, publiés en 1912, s'en font l'écho: «Le Ngil! il n'est point encore apparu en ces pages et nous devons le présenter. Le Ngil, c'est le fétiche redouté des femmes et de beaucoup d'hommes, le Ngil, c'est le fétiche chargé de découvrir et de châtier (d'un châtiment qui ne varie jamais, la mort) les femmes infidèles, les voleurs, les meurtriers.»

Trilles rapportait qu'il s'était opposé au Ngil et avait manqué de peu d'en mourir. Son récit fit ainsi connaître cette société secrète justicière qui, contrairement aux rituels familiaux, s'exerçait à une échelle plus large de la communauté. Cependant, les excès lyriques et fantasques de Trilles décrédibilisent une part de son récit: «Il ne me déplait pas, après tout, de connaître une bonne fois ce qu'est le fameux Ngil, et puis, comment, moi prêtre et français, je reculerais devant ce fétiche? Allons donc! [...] Le blanc, lui, le Français surtout, âme guerrière, soldat avant tout, regarde le danger face à face et porte la main à la garde de son épée. Son cri de guerre, c'est "Garde à vous!" c'est-à-dire épée au vent. Je suis Français, j'attends, la main sur mon crucifix, et au dernier moment, un de mes enfants, ouvrant brusquement la porte de sa case, se jette à mes côtés, me tend, et se sauve de nouveau en courant.»

Et de fait, quand en 1913, l'ethnologue allemand Günter Tessmann publia ses deux volumes sur les Pangwés (les Fangs) et les illustra de dessins et de photographies, il n'y fit aucune allusion à l'extrême violence du Ngil, si tangible sous la plume exaltée de Trilles. En revanche, il décrivit des figures de gorille façonnées en terre et allongées sur le sol trou- vées au sud de l'actuelle Guinée équatoriale et

qui représentaient le pouvoir du Ngil. Pour lui, le Ngil était un culte du feu purificateur lié à la figure du gorille.

Les ouvrages de Trilles et Tessmann, qui sont devenus des références sur la culture Fang et le Ngil, ont paru après l'interdiction du rituel

Le Ngil a été présenté comme un groupe violent, mais sa vocation était peut-être autre

Ngil par les autorités coloniales en 1910. Ce rituel était alors à peine réellement connu du monde occidental, mais cela n'a pas empêché la circulation dans le monde de quelques rares masques dits «du Ngil». À l'ouverture du musée du quai Branly, en 2006, le prix d'un masque s'est ainsi encore envolé aux enchères à plusieurs millions d'euros.

Est-ce le mystère autour des Fangs et de la société secrète proprement dite qui a attisé la curiosité de l'Occident? De manière extrême, il est même tentant de s'interroger sur l'existence du Ngil en tant que société secrète violente. Et s'il avait été imaginé pour nourrir la soif occidentale de fantasmes? Ou pour cristalliser un danger politique pour le pouvoir colonial, tout comme les Hommes-léopards du Congo belge, confrérie d'initiés regroupant plusieurs clans et permettant la cohésion des communautés, inquiétaient le pouvoir occidental à l'époque?

Le fait est qu'entre l'interdiction du rituel et les récits des explorateurs sur le gorille et les Fangs, le Ngil a été présenté comme un groupe puissant et violent, alors qu'il avait peut-être une tout autre vocation. Fernand Grébert, missionnaire au Gabon, rapporta en effet en 1922 la mythologie fang suivante, qui révélait la fraternité de l'homme et du gorille: «Dieu habitait le centre de l'Afrique avec ses trois fils: le blanc, le noir et le gorille.» Le Ngil était peut-être la manifestation de cette mythologie et de la filiation que les Fangs avaient construite entre l'homme et le gorille. Une croyance que les Occidentaux auraient déformée en une vision très colonialiste du gorille et des peuples colonisés... Et si les masques du Ngil n'étaient qu'une invention colonialiste? ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Herzfeld, *Petite Histoire des grands singes*, Seuil, 2012.

L. Perrois, *Fang, 5 Continents*, 2006.

W. Rubin, «Primitivism » in 20th century Art. Affinity of the Tribal and the Modern, The Museum of Modern Art NY, 1984.

F. Grébert, *Au Gabon (Afrique équatoriale française)*, Société des missions évangéliques de Paris, 1922.

H.-L. Trilles, *Chez les Fang, ou quinze années de séjour au Congo français*, Déclée, De Brouwer et Cie, 1912.

T. S. Savage et J. Wyman, *Notice of the external characters and habits of Troglodytes gorilla, a new species of Orang from the Gabon river*, Boston Journal of Natural History, vol. V(IV), 1847.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

MESURER LE TEMPS EN ALLUMANT DES MÈCHES

Un problème de récréation mathématique fait surgir des énoncés indécidables plus simples que ceux que l'on connaissait.

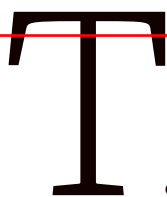
L'AUTEUR



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



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



Tout commence avec le problème de récréation mathématique suivant. Vous disposez de deux mèches qui, chacune, brûle en 1 minute quand on en allume une extrémité. Vous pouvez allumer les deux extrémités d'une mèche en même temps si vous le souhaitez, mais vous ne pouvez pas les couper, car leur homogénéité n'est pas parfaite et il n'est donc pas certain qu'elles brûlent à vitesse constante. On suppose aussi que la vitesse de combustion des mèches ne dépend pas du sens de la propagation du feu. Comment s'y prendre pour mesurer une durée de 45 secondes ?

C'est relativement facile : vous allumez les deux extrémités de la première mèche et une extrémité de la seconde. Vous attendez que la première mèche soit entièrement consumée. Cela prend 30 secondes. À l'instant où la première mèche finit de brûler, vous allumez la seconde extrémité de l'autre mèche dont une partie (la moitié « temporelle ») a déjà brûlé. Il faut 15 secondes supplémentaires pour que la deuxième mèche se consume entièrement. Cela fait un total de 45 secondes (voir l'encadré 1).

Bien sûr, le problème se généralise et on peut simplement s'interroger sur les durées mesurables quand on dispose d'autant de mèches que nécessaire, chacune brûlant en une unité de temps.

Comme précédemment, on ne s'autorise pas à couper les mèches, car cela serait inutile : elles ne brûlent pas à vitesse constante, seule la durée totale de combustion est certaine. On imagine aussi qu'on est assez adroit pour allumer simultanément autant d'extrémités de mèches qu'on le désire, à condition de le faire soit à l'instant 0, soit à des instants où d'autres mèches cessent de brûler.

L'ensemble F des instants qu'on peut mesurer avec de telles mèches est l'ensemble des nombres dits « fusibles ». Amusez-vous à montrer que $23/16$ et $53/32$ sont des nombres fusibles (voir l'encadré 1 pour les solutions).

L'ensemble F est d'une incroyable richesse qui a été découverte et étudiée par Jeff Erickson, de l'université de l'Illinois, aux États-Unis, Gabriel Nivasch, de l'université d'Ariel, en Israël, et Junyan Xu, de l'université de l'Indiana à Bloomington, aux États-Unis. Bien que le sujet soit exploré depuis plusieurs années, ce n'est que tout récemment que ces trois chercheurs ont publié un article détaillé (voir la bibliographie) décrivant la structure de F ainsi que des conséquences étonnantes impliquant la notion d'indécidabilité.

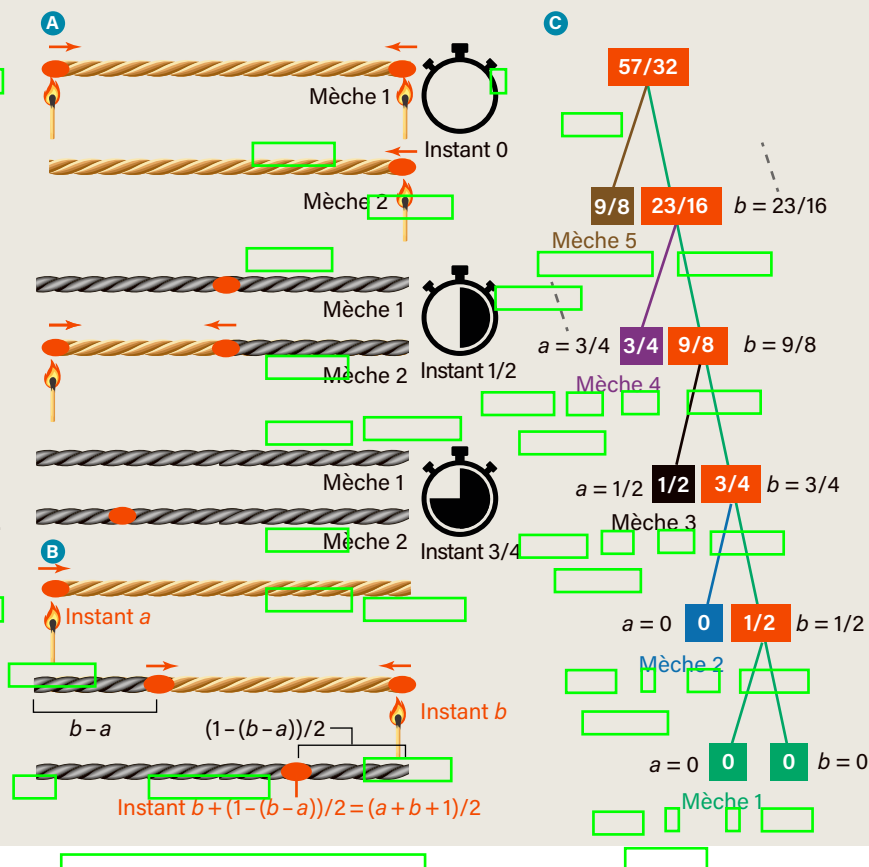
Comprendre les nombres fusibles exige l'utilisation d'outils avancés qui échappent à l'arithmétique de base, l'« arithmétique de

MÈCHES SIMPLES

Avec deux mèches brûlant une unité de temps quand on en allume une extrémité, il faut mesurer $3/4$ d'unité de temps. La solution est donnée en A.

En B, on a dessiné le schéma montrant que si l'on connaît des solutions pour les durées a et b avec $|a - b| \leq 1$, on en connaît aussi une pour $(a + b + 1)/2$.

Cette formule est utilisée sur le graphe C pour l'allumage des mèches afin d'obtenir les durées $1/2$, $3/4$, $9/8$, $23/16$, $57/32$. On obtient le temps $1/2$ avec $a = 0$, $b = 0$ (une seule mèche), le temps $3/4$ avec $a = 0$ et $b = 1/2$ (deux mèches), $9/8$ avec $a = 1/2$ et $b = 3/4$ (trois mèches), etc.



Peano». C'est la première fois que cette impuissance apparaît à propos d'un problème aussi élémentaire tiré d'une récréation mathématique. Nous verrons aussi que le problème conduit à la définition d'une fonction aux propriétés inouïes et qui fera plier tout ordinateur, aussi puissant soit-il.

On sait donc maintenant que l'indécidabilité démontrée par le logicien autrichien Kurt Gödel concerne des énoncés élémentaires. Cela montre, pour ceux qui en doutaient encore, qu'elle n'est pas un jeu gratuit de logiciens, mais bien une difficulté sur laquelle tout mathématicien peut tomber par surprise.

DÉFINITION EN UNE LIGNE

L'ensemble F des nombres fusibles se définit par une formule qui tient sur une ligne:

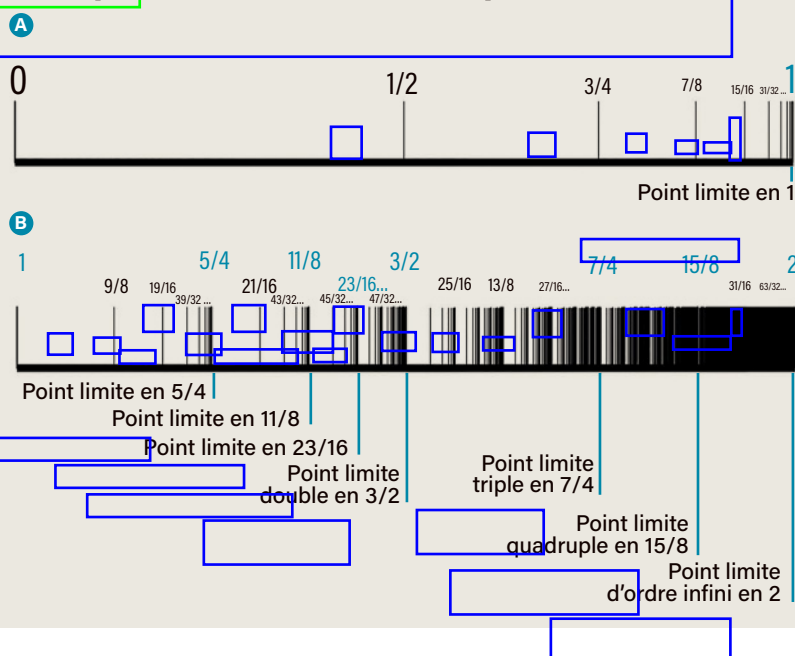
$$0 \in F \text{ et } [a, b \in F \text{ et } |a - b| \leq 1 \Rightarrow (a + b + 1)/2 \in F].$$

Justifions cette formule. Soit a et b deux nombres fusibles tels que $a < b$ et tels que leur différence soit inférieure à 1, la longueur d'une mèche en unité de temps. Par hypothèse, on sait mesurer les durées a et b . On prend une mèche de plus que celles nécessaires pour mesurer a et b ; on en allume une extrémité à l'instant a , et l'autre extrémité à l'instant b . La mèche brûle donc durant $b - a$ unité de temps avant que sa seconde extrémité soit allumée. La longueur de mèche restante correspond alors à $1 - (b - a)$ unité de temps. Et comme ce restant est allumé à ses deux extrémités, il brûle en $(1 - (b - a))/2$ unité de temps (voir l'encadré 1). Au total, la mèche finira de brûler précisément à l'instant:

L'ENSEMBLE DES NOMBRES FUSIBLES

L'ensemble F des nombres fusibles est l'ensemble des durées qu'on peut mesurer avec des mèches, comme dessiné dans l'encadré 1. Grâce à la formule qui indique que si a et b sont dans F avec $|a - b| < 1$, alors $(a + b + 1)/2$ est aussi dans F , on trouve plusieurs séries infinies de nombres fusibles.

En A, on a figuré la série $1 - 1/2^n$, qui donne le point limite 1 (voir les calculs dans le texte de l'article). En B, on commence par la série $5/4 - 1/2^{n+1}$, qui donne le point limite $5/4$. Tous les nombres de la forme $3/2 - 1/2^{m+1}$ sont aussi des points limites, et donc le nombre $5/2$ est un point limite de points limites (« point limite double »). On trouve, plus à droite, que $7/4$ est un point limite de points limites de points limites, qu'on dénommera « point limite triple ». Et ainsi de suite. Cela conduit à un point limite d'ordre infini en 2.



3

$a + (b-a) + (1-(b-a))/2 = (a+b+1)/2$. Par commodité, on notera $a \sim b$ pour $(a+b+1)/2$.

Une autre propriété de F est évidente: si a et b sont des nombres fusibles, alors $a+b$ est aussi un nombre fusible: on prend des mèches pour arriver à l'instant a , puis d'autres mèches pour b , qu'on utilise en commençant à l'instant a ; on atteint alors l'instant $a+b$.

Nous avons vu que $0, 1/2, 3/4$ et 1 sont des nombres fusibles. Il en est donc de même de toutes les sommes qu'on peut faire avec ces quatre nombres.

Examinons de plus près l'ensemble F . Il contient aussi:

$$0 \sim 3/4 = 7/8 = 1 - 1/8;$$

$$0 \sim 7/8 = 15/16 = 1 - 1/16;$$

$$0 \sim 15/16 = 31/32 = 1 - 1/32; \text{ etc.}$$

Pour tout entier positif n , le nombre $1 - 1/2^n$ est donc dans F . On peut représenter cela comme dans l'encadré 2. Le nombre 1 , qui est dans F , est la limite d'une suite croissante de points de F . On dit que 1 est un point limite de points de F . On vérifie que pour tout entier n ,

$1/2 \sim (1 - 1/2^n) = 5/4 - 1/2^{n+1}$, et donc $5/4$ est lui aussi un point limite de points de F . Il en est de même de $11/8$, car $3/4 \sim (1 - 1/2^n) = 11/8 - 1/2^{n+1}$. Plus généralement, $(1 - 1/2^m) \sim (1 - 1/2^n) = 3/2 - 1/2^{m+1} - 1/2^{n+1}$ et donc tous les nombres de la forme $3/2 - 1/2^{m+1}$ sont des points limites.

C'est amusant: le nombre $3/2$ est un point limite de points limites. Nous dirons que c'est un «point limite double» (voir la figure de l'encadré 2).

En poursuivant l'étude, on trouve que $7/4$ est un point limite de points limites de points limites, qu'on dénommera «point limite triple». Mais ce n'est pas fini: il existe un point limite quadruple ($15/8$), quintuple ($31/16$), etc. Ces points limites sont de plus en plus serrés les uns contre les autres et s'approchent de 2 , ce qui fait de 2 un «point limite d'ordre infini». Regardez attentivement l'encadré 2 et repérez bien cette cascade fascinante de points limites multiples.

Bien sûr, au-delà de 2 , les choses empirent et les points de F se tassent encore bien plus

LES ORDINAUX DE CANTOR

L'idée des ordinaux de Cantor est que l'on peut sans problème ajouter aux entiers un nombre symbolique ω et décréter qu'il est plus grand que tous les entiers $0, 1, 2, \dots, n, \dots$. On obtient un nouvel ensemble ordonné qui a un point à l'infini. On peut de même ajouter un nouveau nombre symbolique $\omega + 1$ et décréter qu'il est plus grand que ω . On ajoute ensuite $\omega + 2, \omega + 3$, etc.

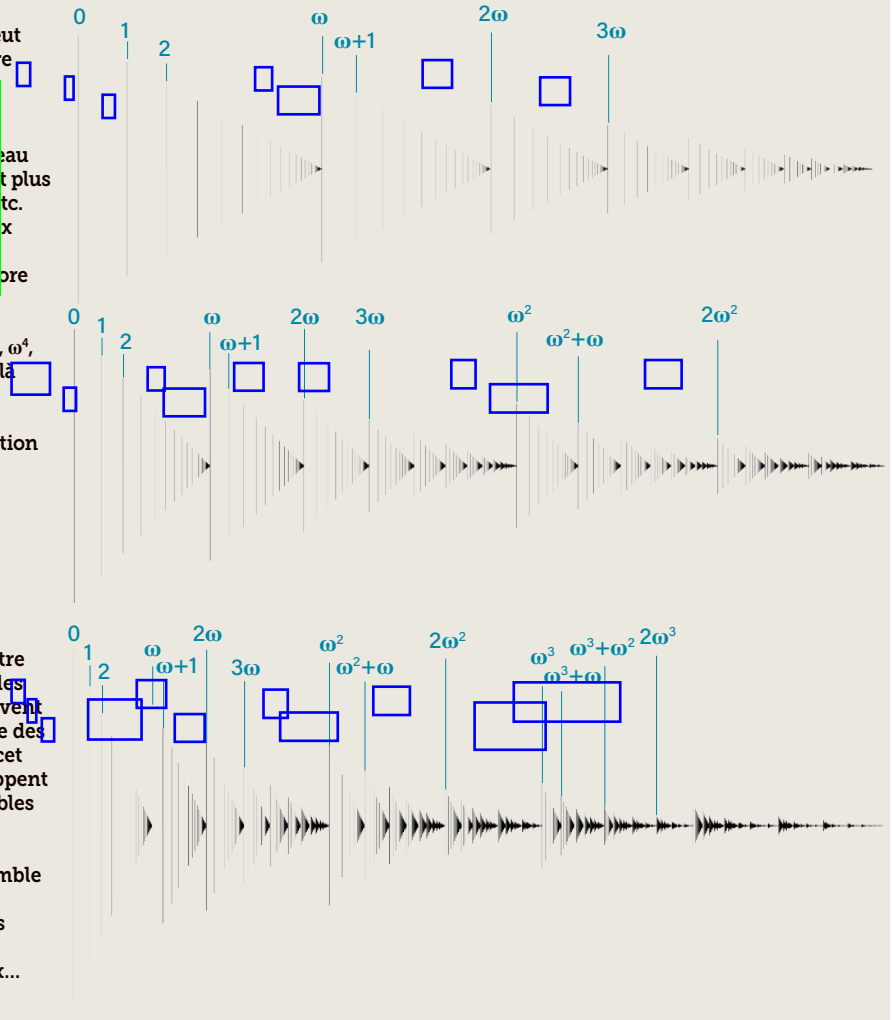
Une fois cet ensemble infini de nouveaux nombres obtenu, on peut à nouveau ajouter un élément symbolique 2ω , puis ajouter encore $2\omega + 1$, puis $2\omega + 2, \dots$. Au-delà, on arrive à $3\omega, 3\omega + 1, \dots$. Une fois tous les $n\omega$ considérés, on arrive à ω^2 . L'idée se prolonge: on arrive à $\omega^3, \omega^4, \dots$, puis ω^ω , puis encore et encore, bien au-delà de tout ce qu'on peut imaginer. C'est ce qu'on nomme les «ordinaux de Cantor». John von Neumann en a proposé une définition ensembliste (voir le texte) qui rend précise la notion générale. Heureusement, pour comprendre la structure de l'ensemble F des nombres fusibles, il suffit de considérer le processus de génération des ordinaux jusqu'aux tours de ω :

$$\omega, \omega, \omega, \omega, \dots$$

L'ordinal qui suit est ω , dont on démontre qu'en un certain sens, c'est un ordinal que les axiomes de l'arithmétique de Peano ne peuvent pas maîtriser. Comme justement l'ensemble des nombres fusibles a la même structure que cet ordinal, certaines des propriétés de F échappent aux axiomes de Peano et sont des indécidables pour l'arithmétique de Peano.

Les figures sont des représentations un peu moins brutales que celles de l'ensemble des nombres fusibles illustré à l'encadré 2.

Ces dessins (merci à David Madore de nous avoir autorisés à les utiliser), permettent de visualiser progressivement les ordinaux... du moins les plus petits!



les uns contre les autres. Cela se produit d'une manière très ordonnée, même si notre esprit a un peu de mal à la saisir.

Le raisonnement mathématique s'impose. Il confirme que l'ensemble des nombres fusibles n'est pas un désordre inextricable, mais un objet soigneusement et rigoureusement agencé. Un premier résultat sur le nombre de mèches nécessaires pour arriver à un nombre fusible p se démontre par un raisonnement par récurrence. Il prouve que les nombres fusibles appartiennent tous à une catégorie bien particulière de nombres réels.

À LA RECHERCHE DE L'ORDRE DES NOMBRES FUSIBLES

Ce premier résultat est que F ne contient que des nombres dyadiques, c'est-à-dire de la forme $k/2^n$, où k et n sont des entiers positifs. Ils sont l'équivalent pour la numération binaire des nombres décimaux : dans le système binaire, leur écriture est finie.

Pour le démontrer, on suppose que tous les nombres fusibles auxquels on peut accéder en utilisant k mèches au plus sont dyadiques. On voit, d'après la formule donnant $a \sim b$, que c'est encore vrai pour ceux qu'on atteint avec $k+1$ mèches, et donc c'est vrai pour tous les nombres fusibles.

Une conséquence de ce résultat est que F contient une infinité dénombrable d'éléments ; autrement dit, ses éléments pourraient être numérotés $p_0, p_1, \dots, p_n, \dots$

Les deux résultats suivants sont plus difficiles à démontrer. Vous trouverez le détail des raisonnements dans l'article des trois chercheurs cités plus haut (voir la bibliographie).

D'abord, F est fermé au sens topologique, ce qui veut dire que toute suite convergente de nombres fusibles a pour limite un point qui est lui-même un nombre fusible.

Ensuite, F ne comporte pas de suite décroissante infinie ou, ce qui revient au même : pour tout nombre fusible p , il existe un nombre $\varepsilon > 0$ tel que l'intervalle $]p, p+\varepsilon[$ (c'est-à-dire les nombres x vérifiant $p < x < p+\varepsilon$) ne contient aucun autre élément de F .

Dit encore autrement, le dernier résultat signifie qu'il y a des points limites quand on va vers la droite, mais qu'il n'y en a pas quand on va vers la gauche. C'est un peu étonnant, mais en regardant bien le dessin (même seulement jusqu'à $3/2$), on comprend que ça n'est en rien absurde.

Notons aussi qu'entre 0 et 1, il n'y a aucun autre nombre fusible que ceux mentionnés, c'est-à-dire de la forme $1 - 1/2^n$ avec n entier.

Ceux qui ont déjà entendu parler des nombres ordinaux de Georg Cantor (1845-1918) ont reconnu que les nombres fusibles sont probablement liés à de tels nombres. C'est effectivement le cas et l'ensemble des nombres

4

UNE FONCTION INDÉCIDABLE ET IMPRATICABLE

Quand on cherche à savoir quel est l'espace ne contenant pas de nombres fusibles derrière les nombres entiers, on tombe sur une fonction qui décroît très rapidement vers 0. Cet espace libre derrière 1 est plus petit que $M(1) = 1/8$. Il est plus petit que $M(2) = 1/2^{10}$ pour l'entier 2, et plus petit que $M(3) = 1/2^{1541\,023\,937}$ pour 3. Pour 4, on ne sait pas le calculer : le calcul devient trop long, même si on sait qu'il est fini.

La fonction qui donne ce majorant a une définition très simple :

Si $x < 0$, alors $M(x) = -x$;
si $x \geq 0$, alors $M(x) = M(x - M(x - 1))/2$.

Pour utiliser cette définition pour une valeur x , on lance le programme exprimant la définition et on le laisse faire. Il lancera le programme pour d'autres valeurs y , qui lanceront le programme pour d'autres valeurs, etc. Au bout du compte, quel que soit le x choisi, le programme conclura – si la puissance de calcul de l'ordinateur est suffisante.

Considérons par exemple le calcul de $M(1) = M(1 - M(1 - 1))/2$. Le programme a besoin de $M(1 - 1) = M(0)$. Il lance donc le calcul $M(0) = M(0 - M(-1))/2$, ce qui lui fait

demander $M(-1)$. Le calcul de $M(-1)$ est immédiat et donne 1. Il peut donc simplifier $M(0 - M(-1))/2$ qui devient $M(-1)/2$, qui se simplifie en $1/2$: $M(0) = 1/2$. Il doit donc maintenant calculer $M(1/2) = M(1/2 - M(1/2 - 1))/2$, etc. La suite du calcul est représentée ci-dessous avec des notations évidentes. Le tout aboutit à $M(1) = 1/8$. Deux autres dessins représentent les calculs pour $M(3/2) = 1/32$ et $M(2) = 1/1\,024$. Ça marche, mais ça se complique !

Pour tout nombre réel x , la fonction M termine toujours son calcul. Jamais elle ne se met à tourner en rond, ce qui se produirait si $M(y)$ appelait $M(y)$. L'affirmation « la fonction M termine toujours » se démontre, mais en utilisant des théories plus puissantes que l'arithmétique de Peano. Même en la simplifiant en « la fonction M termine pour tout entier », c'est une affirmation indécidable de l'arithmétique de Peano.

Avant la découverte de M , on ne connaissait aucune fonction aussi simple dont le comportement échappait au pouvoir de démonstration de l'arithmétique de Peano.

```
M(1):
M(0):
M(-1)=1
M(-1)=1
M(0)=1/2
M(1/2):
M(-1/2)=1/2
M(0):
M(-1)=1
M(-1)=1
M(0)=1/2
M(1/2)=1/4
M(1)=1/8
```

```
M(3/2):
M(1/2):
M(-1/2)=1/2
M(0):
M(-1)=1
M(-1)=1
M(0)=1/2
M(1/2)=1/4
M(5/4):
M(1/4):
M(-3/4)=3/4
M(-1/2)=1/2
M(1/4)=1/4
M(1):
M(-1)=1
M(-1)=1
M(0)=1/2
M(1/2)=1/4
M(3/2)=1/32
```

```
M(2):
M(1):
M(0):
M(-1)=1
M(-1)=1
M(0)=1/2
M(1/2):
M(-1/2)=1/2
M(0):
M(-1)=1
M(-1)=1
M(0)=1/2
M(1/2)=1/4
M(3/4):
M(1/4):
M(-3/4)=3/4
M(-1/2)=1/2
M(1/4)=1/4
M(5/8):
M(3/8):
M(-5/8)=5/8
M(-1/2)=1/2
M(3/8)=3/8
M(7/8):
M(1/8):
M(-7/8)=7/8
M(-1/2)=1/2
M(1/8)=1/8
M(9/8):
M(5/8):
M(-5/8)=5/8
M(-1/2)=1/2
M(5/8)=5/8
M(13/8):
M(9/8):
M(-9/8)=9/8
M(-1/2)=1/2
M(9/8)=9/8
M(17/8):
M(13/8):
M(-13/8)=13/8
M(-1/2)=1/2
M(13/8)=13/8
M(21/8):
M(17/8):
M(-17/8)=17/8
M(-1/2)=1/2
M(17/8)=17/8
M(25/8):
M(21/8):
M(-21/8)=21/8
M(-1/2)=1/2
M(21/8)=21/8
M(29/8):
M(25/8):
M(-25/8)=25/8
M(-1/2)=1/2
M(25/8)=25/8
M(33/8):
M(29/8):
M(-29/8)=29/8
M(-1/2)=1/2
M(29/8)=29/8
M(37/8):
M(33/8):
M(-33/8)=33/8
M(-1/2)=1/2
M(33/8)=33/8
M(41/8):
M(37/8):
M(-37/8)=37/8
M(-1/2)=1/2
M(37/8)=37/8
M(45/8):
M(41/8):
M(-41/8)=41/8
M(-1/2)=1/2
M(41/8)=41/8
M(49/8):
M(45/8):
M(-45/8)=45/8
M(-1/2)=1/2
M(45/8)=45/8
M(53/8):
M(49/8):
M(-49/8)=49/8
M(-1/2)=1/2
M(49/8)=49/8
M(57/8):
M(53/8):
M(-53/8)=53/8
M(-1/2)=1/2
M(53/8)=53/8
M(61/8):
M(57/8):
M(-57/8)=57/8
M(-1/2)=1/2
M(57/8)=57/8
M(65/8):
M(61/8):
M(-61/8)=61/8
M(-1/2)=1/2
M(61/8)=61/8
M(69/8):
M(65/8):
M(-65/8)=65/8
M(-1/2)=1/2
M(65/8)=65/8
M(73/8):
M(69/8):
M(-69/8)=69/8
M(-1/2)=1/2
M(69/8)=69/8
M(77/8):
M(73/8):
M(-73/8)=73/8
M(-1/2)=1/2
M(73/8)=73/8
M(81/8):
M(77/8):
M(-77/8)=77/8
M(-1/2)=1/2
M(77/8)=77/8
M(85/8):
M(81/8):
M(-81/8)=81/8
M(-1/2)=1/2
M(81/8)=81/8
M(89/8):
M(85/8):
M(-85/8)=85/8
M(-1/2)=1/2
M(85/8)=85/8
M(93/8):
M(89/8):
M(-89/8)=89/8
M(-1/2)=1/2
M(89/8)=89/8
M(97/8):
M(93/8):
M(-93/8)=93/8
M(-1/2)=1/2
M(93/8)=93/8
M(101/8):
M(97/8):
M(-97/8)=97/8
M(-1/2)=1/2
M(97/8)=97/8
M(105/8):
M(101/8):
M(-101/8)=101/8
M(-1/2)=1/2
M(101/8)=101/8
M(109/8):
M(105/8):
M(-105/8)=105/8
M(-1/2)=1/2
M(105/8)=105/8
M(113/8):
M(109/8):
M(-109/8)=109/8
M(-1/2)=1/2
M(109/8)=109/8
M(117/8):
M(113/8):
M(-113/8)=113/8
M(-1/2)=1/2
M(113/8)=113/8
M(121/8):
M(117/8):
M(-117/8)=117/8
M(-1/2)=1/2
M(117/8)=117/8
M(125/8):
M(121/8):
M(-121/8)=121/8
M(-1/2)=1/2
M(121/8)=121/8
M(129/8):
M(125/8):
M(-125/8)=125/8
M(-1/2)=1/2
M(125/8)=125/8
M(133/8):
M(129/8):
M(-129/8)=129/8
M(-1/2)=1/2
M(129/8)=129/8
M(137/8):
M(133/8):
M(-133/8)=133/8
M(-1/2)=1/2
M(133/8)=133/8
M(141/8):
M(137/8):
M(-137/8)=137/8
M(-1/2)=1/2
M(137/8)=137/8
M(145/8):
M(141/8):
M(-141/8)=141/8
M(-1/2)=1/2
M(141/8)=141/8
M(149/8):
M(145/8):
M(-145/8)=145/8
M(-1/2)=1/2
M(145/8)=145/8
M(153/8):
M(149/8):
M(-149/8)=149/8
M(-1/2)=1/2
M(149/8)=149/8
M(157/8):
M(153/8):
M(-153/8)=153/8
M(-1/2)=1/2
M(153/8)=153/8
M(161/8):
M(157/8):
M(-157/8)=157/8
M(-1/2)=1/2
M(157/8)=157/8
M(165/8):
M(161/8):
M(-161/8)=161/8
M(-1/2)=1/2
M(161/8)=161/8
M(169/8):
M(165/8):
M(-165/8)=165/8
M(-1/2)=1/2
M(165/8)=165/8
M(173/8):
M(169/8):
M(-169/8)=169/8
M(-1/2)=1/2
M(169/8)=169/8
M(177/8):
M(173/8):
M(-173/8)=173/8
M(-1/2)=1/2
M(173/8)=173/8
M(181/8):
M(177/8):
M(-177/8)=177/8
M(-1/2)=1/2
M(177/8)=177/8
M(185/8):
M(181/8):
M(-181/8)=181/8
M(-1/2)=1/2
M(181/8)=181/8
M(189/8):
M(185/8):
M(-185/8)=185/8
M(-1/2)=1/2
M(185/8)=185/8
M(193/8):
M(189/8):
M(-189/8)=189/8
M(-1/2)=1/2
M(189/8)=189/8
M(197/8):
M(193/8):
M(-193/8)=193/8
M(-1/2)=1/2
M(193/8)=193/8
M(201/8):
M(197/8):
M(-197/8)=197/8
M(-1/2)=1/2
M(197/8)=197/8
M(205/8):
M(201/8):
M(-201/8)=201/8
M(-1/2)=1/2
M(201/8)=201/8
M(209/8):
M(205/8):
M(-205/8)=205/8
M(-1/2)=1/2
M(205/8)=205/8
M(213/8):
M(209/8):
M(-209/8)=209/8
M(-1/2)=1/2
M(209/8)=209/8
M(217/8):
M(213/8):
M(-213/8)=213/8
M(-1/2)=1/2
M(213/8)=213/8
M(221/8):
M(217/8):
M(-217/8)=217/8
M(-1/2)=1/2
M(217/8)=217/8
M(225/8):
M(221/8):
M(-221/8)=221/8
M(-1/2)=1/2
M(221/8)=221/8
M(229/8):
M(225/8):
M(-225/8)=225/8
M(-1/2)=1/2
M(225/8)=225/8
M(233/8):
M(229/8):
M(-229/8)=229/8
M(-1/2)=1/2
M(229/8)=229/8
M(237/8):
M(233/8):
M(-233/8)=233/8
M(-1/2)=1/2
M(233/8)=233/8
M(241/8):
M(237/8):
M(-237/8)=237/8
M(-1/2)=1/2
M(237/8)=237/8
M(245/8):
M(241/8):
M(-241/8)=241/8
M(-1/2)=1/2
M(241/8)=241/8
M(249/8):
M(245/8):
M(-245/8)=245/8
M(-1/2)=1/2
M(245/8)=245/8
M(253/8):
M(249/8):
M(-249/8)=249/8
M(-1/2)=1/2
M(249/8)=249/8
M(257/8):
M(253/8):
M(-253/8)=253/8
M(-1/2)=1/2
M(253/8)=253/8
M(261/8):
M(257/8):
M(-257/8)=257/8
M(-1/2)=1/2
M(257/8)=257/8
M(265/8):
M(261/8):
M(-261/8)=261/8
M(-1/2)=1/2
M(261/8)=261/8
M(269/8):
M(265/8):
M(-265/8)=265/8
M(-1/2)=1/2
M(265/8)=265/8
M(273/8):
M(269/8):
M(-269/8)=269/8
M(-1/2)=1/2
M(269/8)=269/8
M(277/8):
M(273/8):
M(-273/8)=273/8
M(-1/2)=1/2
M(273/8)=273/8
M(281/8):
M(277/8):
M(-277/8)=277/8
M(-1/2)=1/2
M(277/8)=277/8
M(285/8):
M(281/8):
M(-281/8)=281/8
M(-1/2)=1/2
M(281/8)=281/8
M(289/8):
M(285/8):
M(-285/8)=285/8
M(-1/2)=1/2
M(285/8)=285/8
M(293/8):
M(289/8):
M(-289/8)=289/8
M(-1/2)=1/2
M(289/8)=289/8
M(297/8):
M(293/8):
M(-293/8)=293/8
M(-1/2)=1/2
M(293/8)=293/8
M(301/8):
M(297/8):
M(-297/8)=297/8
M(-1/2)=1/2
M(297/8)=297/8
M(305/8):
M(301/8):
M(-301/8)=301/8
M(-1/2)=1/2
M(301/8)=301/8
M(309/8):
M(305/8):
M(-305/8)=305/8
M(-1/2)=1/2
M(305/8)=305/8
M(313/8):
M(309/8):
M(-309/8)=309/8
M(-1/2)=1/2
M(309/8)=309/8
M(317/8):
M(313/8):
M(-313/8)=313/8
M(-1/2)=1/2
M(313/8)=313/8
M(321/8):
M(317/8):
M(-317/8)=317/8
M(-1/2)=1/2
M(317/8)=317/8
M(325/8):
M(321/8):
M(-321/8)=321/8
M(-1/2)=1/2
M(321/8)=321/8
M(329/8):
M(325/8):
M(-325/8)=325/8
M(-1/2)=1/2
M(325/8)=325/8
M(333/8):
M(329/8):
M(-329/8)=329/8
M(-1/2)=1/2
M(329/8)=329/8
M(337/8):
M(333/8):
M(-333/8)=333/8
M(-1/2)=1/2
M(333/8)=333/8
M(341/8):
M(337/8):
M(-337/8)=337/8
M(-1/2)=1/2
M(337/8)=337/8
M(345/8):
M(341/8):
M(-341/8)=341/8
M(-1/2)=1/2
M(341/8)=341/8
M(349/8):
M(345/8):
M(-345/8)=345/8
M(-1/2)=1/2
M(345/8)=345/8
M(353/8):
M(349/8):
M(-349/8)=349/8
M(-1/2)=1/2
M(349/8)=349/8
M(357/8):
M(353/8):
M(-353/8)=353/8
M(-1/2)=1/2
M(353/8)=353/8
M(361/8):
M(357/8):
M(-357/8)=357/8
M(-1/2)=1/2
M(357/8)=357/8
M(365/8):
M(361/8):
M(-361/8)=361/8
M(-1/2)=1/2
M(361/8)=361/8
M(369/8):
M(365/8):
M(-365/8)=365/8
M(-1/2)=1/2
M(365/8)=365/8
M(373/8):
M(369/8):
M(-369/8)=369/8
M(-1/2)=1/2
M(369/8)=369/8
M(377/8):
M(373/8):
M(-373/8)=373/8
M(-1/2)=1/2
M(373/8)=373/8
M(381/8):
M(377/8):
M(-377/8)=377/8
M(-1/2)=1/2
M(377/8)=377/8
M(385/8):
M(381/8):
M(-381/8)=381/8
M(-1/2)=1/2
M(381/8)=381/8
M(389/8):
M(385/8):
M(-385/8)=385/8
M(-1/2)=1/2
M(385/8)=385/8
M(393/8):
M(389/8):
M(-389/8)=389/8
M(-1/2)=1/2
M(389/8)=389/8
M(397/8):
M(393/8):
M(-393/8)=393/8
M(-1/2)=1/2
M(393/8)=393/8
M(401/8):
M(397/8):
M(-397/8)=397/8
M(-1/2)=1/2
M(397/8)=397/8
M(405/8):
M(401/8):
M(-401/8)=401/8
M(-1/2)=1/2
M(401/8)=401/8
M(409/8):
M(405/8):
M(-405/8)=405/8
M(-1/2)=1/2
M(405/8)=405/8
M(413/8):
M(409/8):
M(-409/8)=409/8
M(-1/2)=1/2
M(409/8)=409/8
M(417/8):
M(413/8):
M(-413/8)=413/8
M(-1/2)=1/2
M(413/8)=413/8
M(421/8):
M(417/8):
M(-417/8)=417/8
M(-1/2)=1/2
M(417/8)=417/8
M(425/8):
M(421/8):
M(-421/8)=421/8
M(-1/2)=1/2
M(421/8)=421/8
M(429/8):
M(425/8):
M(-425/8)=425/8
M(-1/2)=1/2
M(425/8)=425/8
M(433/8):
M(429/8):
M(-429/8)=429/8
M(-1/2)=1/2
M(429/8)=429/8
M(437/8):
M(433/8):
M(-433/8)=433/8
M(-1/2)=1/2
M(433/8)=433/8
M(441/8):
M(437/8):
M(-437/8)=437/8
M(-1/2)=1/2
M(437/8)=437/8
M(445/8):
M(441/8):
M(-441/8)=441/8
M(-1/2)=1/2
M(441/8)=441/8
M(449/8):
M(445/8):
M(-445/8)=445/8
M(-1/2)=1/2
M(445/8)=445/8
M(453/8):
M(449/8):
M(-449/8)=449/8
M(-1/2)=1/2
M(449/8)=449/8
M(457/8):
M(453/8):
M(-453/8)=453/8
M(-1/2)=1/2
M(453/8)=453/8
M(461/8):
M(457/8):
M(-457/8)=457/8
M(-1/2)=1/2
M(457/8)=457/8
M(465/8):
M(461/8):
M(-461/8)=461/8
M(-1/2)=1/2
M(461/8)=461/8
M(469/8):
M(465/8):
M(-465/8)=465/8
M(-1/2)=1/2
M(465/8)=465/8
M(473/8):
M(469/8):
M(-469/8)=469/8
M(-1/2)=1/2
M(469/8)=469/8
M(477/8):
M(473/8):
M(-473/8)=473/8
M(-1/2)=1/2
M(473/8)=473/8
M(481/8):
M(477/8):
M(-477/8)=477/8
M(-1/2)=1/2
M(477/8)=477/8
M(485/8):
M(481/8):
M(-481/8)=481/8
M(-1/2)=1/2
M(481/8)=481/8
M(489/8):
M(485/8):
M(-485/8)=485/8
M(-1/2)=1/2
M(485/8)=485/8
M(493/8):
M(489/8):
M(-489/8)=489/8
M(-1/2)=1/2
M(489/8)=489/8
M(497/8):
M(493/8):
M(-493/8)=493/8
M(-1/2)=1/2
M(493/8)=493/8
M(501/8):
M(497/8):
M(-497/8)=497/8
M(-1/2)=1/2
M(497/8)=497/8
M(505/8):
M(501/8):
M(-501/8)=501/8
M(-1/2)=1/2
M(501/8)=501/8
M(509/8):
M(505/8):
M(-505/8)=505/8
M(-1/2)=1/2
M(505/8)=505/8
M(513/8):
M(509/8):
M(-509/8)=509/8
M(-1/2)=1/2
M(509/8)=509/8
M(517/8):
M(513/8):
M(-513/8)=513/8
M(-1/2)=1/2
M(513/8)=513/8
M(521/8):
M(517/8):
M(-517/8)=517/8
M(-1/2)=1/2
M(517/8)=517/8
M(525/8):
M(521/8):
M(-521/8)=521/8
M(-1/2)=1/2
M(521/8)=521/8
M(529/8):
M(525/8):
M(-525/8)=525/8
M(-1/2)=1/2
M(525/8)=525/8
M(533/8):
M(529/8):
M(-529/8)=529/8
M(-1/2)=1/2
M(529/8)=529/8
M(537/8):
M(533/8):
M(-533/8)=533/8
M(-1/2)=1/2
M(533/8)=533/8
M(541/8):
M(537/8):
M(-537/8)=537/8
M(-1/2)=1/2
M(537/8)=537/8
M(545/8):
M(541/8):
M(-541/8)=541/8
M(-1/2)=1/2
M(541/8)=541/8
M(549/8):
M(545/8):
M(-545/8)=545/8
M(-1/2)=1/2
M(545/8)=545/8
M(553/8):
M(549/8):
M(-549/8)=549/8
M(-1/2)=1/2
M(549/8)=549/8
M(557/8):
M(553/8):
M(-553/8)=553/8
M(-1/2)=1/2
M(553/8)=553/8
M(561/8):
M(557/8):
M(-557/8)=557/8
M(-1/2)=1/2
M(557/8)=557/8
M(565/8):
M(561/8):
M(-561/8)=561/8
M(-1/2)=1/2
M(561/8)=561/8
M(569/8):
M(565/8):
M(-565/8)=565/8
M(-1/2)=1/2
M(565/8)=565/8
M(573/8):
M(569/8):
M(-569/8)=569/8
M(-1/2)=1/2
M(569/8)=569/8
M(577/8):
M(573/8):
M(-573/8)=573/8
M(-1/2)=1/2
M(573/8)=573/8
M(581/8):
M(577/8):
M(-577/8)=577/8
M(-1/2)=1/2
M(577/8)=577/8
M(585/8):
M(581/8):
M(-581/8)=581/8
M(-1/2)=1/2
M(581/8)=581/8
M(589/8):
M(585/8):
M(-585/8)=585/8
M(-1/2)=1/2
M(585/8)=585/8
M(593/8):
M(589/8):
M(-589/8)=589/8
M(-1/2)=1/2
M(589/8)=589/8
M(597/8):
M(593/8):
M(-593/8)=593/8
M(-1/2)=1/2
M(593/8)=593/8
M(601/8):
M(597/8):
M(-597/8)=597/8
M(-1/2)=1/2
M(597/8)=597/8
M(605/8):
M(601/8):
M(-601/8)=601/8
M(-1/2)=1/2
M(601/8)=601/8
M(609/8):
M(605/8):
M(-605/8)=605/8
M(-1/2)=1/2
M(605/8)=605/8
M(613/8):
M(609/8):
M(-609/8)=609/8
M(-1/2)=1/2
M(609/8)=609/8
M(617/8):
M(613/8):
M(-613/8)=613/8
M(-1/2)=1/2
M(613/8)=613/8
M(621/8):
M(617/8):
M(-617/8)=617/8
M(-1/2)=1/2
M(617/8)=617/8
M(625/8):
M(621/8):
M(-621/8)=621/8
M(-1/2)=1/2
M(621/8)=621/8
M(629/8):
M(625/8):
M(-625/8)=625/8
M(-1/2)=1/2
M(625/8)=625/8
M(633/8):
M(629/8):
M(-629/8)=629/8
M(-1/2)=1/2
M(629/8)=629/8
M(637/8):
M(633/8):
M(-633/8)=633/8
M(-1/2)=1/2
M(633/8)=633/8
M(641/8):
M(637/8):
M(-637/8)=637/8
M(-1/2)=1/2
M(637/8)=637/8
M(645/8):
M(641/8):
M(-641/8)=641/8
M(-1/2)=1/2
M(641/8)=641/8
M(649/8):
M(645/8):
M(-645/8)=645/8
M(-1/2)=1/2
M(645/8)=645/8
M(653/8):
M(649/8):
M(-649/8)=649/8
M(-1/2)=1/2
M(649/8)=649/8
M(657/8):
M(653/8):
M(-653/8)=653/8
M(-1/2)=1/2
M(653/8)=653/8
M(661/8):
M(657/8):
M(-657/8)=657/8
M(-1/2)=1/2
M(657/8)=657/8
M(665/8):
M(661/8):
M(-661/8)=661/8
M(-1/2)=1/2
M(661/8)=661/8
M(669/8):
M(665/8):
M(-665/8)=665/8
M(-1/2)=1/2
M(665/8)=665/8
M(673/8):
M(669/8):
M(-669/8)=669/8
M(-1/2)=1/2
M(669/8)=669/8
M(677/8):
M(673/8):
M(-673/8)=673/8
M(-1/2)=1/2
M(673/8)=673/8
M(681/8):
M(677/8):
M(-677/8)=677/8
M(-1/2)=1/2
M(677/8)=677/8
M(685/8):
M(681/8):
M(-681/8)=681/8
M(-1/2)=1/2
M(681/8)=681/8
M(689/8):
M(685/8):
M(-685/8)=685/8
M(-1/2)=1/2
M(685/8)=685/8
M(693/8):
M(689/8):
M(-689/8)=689/8
M(-1/2)=1/2

```

fusibles possède une structure équivalente à celle de l'ordinal ϵ_0 dont nous allons expliquer la nature.

Certains ensembles ordonnés E ont la propriété d'être «bien ordonnés», ce qui veut dire que tout sous-ensemble de E possède un plus petit élément. C'est le cas de l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers positifs ou nuls. Il est en effet bien clair que tout sous-ensemble S de $\mathbb{N}$ possède un plus petit élément: il y a un plus petit nombre impair, qui est 1; il y a un plus petit nombre entier à la fois multiple de 2, 3 et 5, qui est 30; etc. L'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels, lui, n'est pas bien ordonné car, par exemple, le sous-ensemble constitué des nombres réels strictement positifs n'a pas de plus petit élément.

LES ORDINAUX DE CANTOR À LA RESCOUSSE

Les ordinaux découverts par Cantor désignent les différentes sortes d'ensembles bien ordonnés. En utilisant la notation proposée par le mathématicien d'origine hongroise John von Neumann, il y a d'abord les ordinaux finis $0, \{0\}, \{0, 1\}, \{0, 1, 2\}$, etc. L'ensemble $\{0, 1, 2, \dots, n\}$ muni de la relation d'ordre $0 < 1 < 2 < \dots < n$ est, pour von Neumann, l'ordinal $n+1$.

L'ensemble de tous les entiers, nous l'avons dit, est bien ordonné. On le note ω dans ce contexte. En prenant l'ensemble des entiers auquel on ajoute ω (considéré comme un élément), on obtient l'ordinal noté $\omega+1$, qui est $\{0, 1, \dots, n, \dots\} \cup \{\omega\}$, soit $\{\omega, 0, 1, \dots, n, \dots\}$. Cet ensemble est effectivement bien ordonné si l'on convient que ω est un nombre nouveau ajouté aux entiers et qu'il est plus grand que tous les entiers.

L'ordinal ω est le premier ordinal transfini de Cantor. L'ordinal $\omega+1$ est le second ordinal transfini de Cantor. On continue de la même façon en posant, pour tout entier positif n :

$$\omega + (n+1) = (\omega + n) \cup \{\omega + n\}.$$

Arrivé à ce point, on a une double série infinie d'inégalités:

$$0 < 1 < 2 < \dots < n < \dots < \omega$$

$$< \omega + 1 < \omega + 2 < \omega + 3 < \dots < \omega + n < \dots$$

Sans surprise, en regroupant tous ces ordinaux, on en obtient un autre: 2ω . Pour des raisons techniques, on préfère souvent le noter $\omega 2$, mais nous n'utiliserons pas cette convention.

Si, maintenant, vous regardez l'encadré 2 en ne considérant que les nombres fusibles jusqu'à 1 non inclus, vous reconnaîtrez que c'est un ensemble bien ordonné de type ω , c'est-à-dire du même type que $\mathbb{N}$. En ajoutant le nombre 1, c'est un ensemble bien ordonné de type $\omega+1$.

Toujours en examinant l'encadré 2 et cette fois en ne considérant que les nombres fusibles jusqu'à $5/4$ non inclus, vous reconnaîtrez que

c'est un ensemble bien ordonné de type: $2\omega = \{0, 1, \dots, n, \dots\} \cup \{\omega, \omega+1, \dots, \omega+n, \dots\}$. En allant jusqu'à $11/8$, on a 3ω . Jusqu'à $23/16$, on a 4ω . Ne cherchez pas à aller trop vite, regardez bien le dessin.

Au-delà de tous les $n\omega$, n entier, on a ω^2 , qui est le type d'ordre des nombres fusibles jusqu'à $3/2$. C'est lui qui nous a fait utiliser les mots «point limite double». Plus loin, le point limite triple $7/4$ correspond à l'ordinal ω^3 . Au point limite quadruple $15/8$ correspond l'ordinal ω^4 , puis, au-delà de tous ces points limites multiples, on arrive à 2 auquel correspond l'ordinal ω^ω .

Est-ce tout? Non, car au-delà de 2 la construction se poursuit. Les nombres fusibles sont de plus en plus serrés. C'est assez difficile à imaginer avec précision, mais c'est pourtant la structure de F ! On tombe sur des tours de ω :

$$\omega^{\omega^\omega}, \omega^{\omega^{\omega^\omega}}, \text{ etc.}$$

Plus grand que tous ces ordinaux colossaux, juste au-dessus, se trouve celui que l'on note ϵ_0 , qui est l'ordinal correspondant à l'ordre sur les nombres fusibles. Il y a bien d'autres ordinaux encore au-delà de ϵ_0 , mais ils ne concernent plus les nombres fusibles. La totalité des nombres fusibles a un type d'ordre correspondant à ϵ_0 , et c'est déjà pas mal!

UN ÉNONCÉ INDÉCIDABLE DANS L'ARITHMÉTIQUE DE PEANO

Le dire est facile, le démontrer est plus difficile. C'est pourtant ce qu'ont fait les chercheurs autour de Jeff Erickson. Cependant, ils ont obtenu mieux encore. Ils ont considéré la conséquence évidente de ce résultat concernant F et ϵ_0 . L'énoncé G : «Pour tout entier naturel n , il existe un plus petit nombre fusible supérieur à n », et ils ont démontré que même si l'énoncé G s'exprime dans le langage de l'arithmétique de Peano, celle-ci ne peut pas démontrer G . Autrement dit, l'affirmation G est un indécidable de l'arithmétique de Peano.

L'arithmétique de Peano est la théorie dont on se sert pour traiter des nombres entiers et des objets finis, et démontrer leurs propriétés et relations. Les axiomes de Peano contiennent les définitions de l'addition et de la multiplication des entiers et affirment l'exactitude du principe de raisonnement par récurrence. On a démontré que l'arithmétique de Peano est une théorie équivalente, en capacité de démonstration, à la théorie des ensembles dont on enlève l'axiome qui affirme qu'il existe des ensembles infinis pour le remplacer par l'axiome qui affirme que tous les ensembles sont finis.

On a espéré que cette théorie ne laisse échapper aucune affirmation vraie concernant les entiers et les objets finis. Les axiomes de

Peano permettent par exemple de prouver qu'il existe des nombres premiers aussi grands qu'on le veut, et bien d'autres propriétés concernant les graphes qui sont des objets mathématiques finis.

Les théorèmes d'incomplétude démontrés par Gödel en 1931 établissent cependant que l'arithmétique de Peano n'est pas suffisante pour tout savoir des nombres entiers ou des structures finies. Il existe des énoncés, provenant de considérations logiques ou mentionnant des autoréférences et portant uniquement sur les nombres entiers, que les axiomes de Peano ne peuvent pas démontrer, et qui pourtant sont vrais. On sait que de tels énoncés sont vrais, car on les démontre en utilisant des systèmes d'axiomes plus puissants en lesquels on a confiance, comme celui de la théorie des ensembles avec axiome de l'infini.

Même si les nombres fusibles sont des nombres réels, on peut exprimer et démontrer certaines de leurs propriétés en utilisant les axiomes de Peano, ou la théorie des ensembles finis. Il est facile par exemple de démontrer, comme on l'a fait plus haut, que tout nombre fusible est dyadique. L'affirmation G mentionnée précédemment s'exprime dans le formalisme de ces théories, et donc on pouvait espérer qu'elle s'y démontre. Pourtant, G n'est pas démontrable dans l'arithmétique de Peano!

D'autres résultats d'indécidabilité vis-à-vis de Peano concernant des énoncés naturels et n'impliquant pas de notions de logiques mathématiques ont été obtenus en 1977 par Jeff Paris et Leo Harrington. Quelques autres ont suivi. Cela a établi d'une manière assez satisfaisante que, contrairement à ce qui avait été envisagé, certains indécidables ne proviennent pas de raisonnements utilisant des autoréférences logiques qu'un arithméticien n'envisage jamais de lui-même. Pourtant, aucun indécidable connu de l'arithmétique de Peano n'avait cette simplicité du résultat sur l'existence d'un plus petit nombre fusible derrière chaque entier, et aucun ne provient d'un problème de mathématique récréative qu'on peut expliquer en une minute autour d'une tasse de café à ses amis non mathématiciens. L'indécidabilité est donc bien une situation qui peut surgir partout en mathématiques.

UNE FONCTION RÉCURSIVE TRÈS DIFFICILEMENT CALCULABLE

En étudiant la façon dont se serrent de plus en plus les nombres fusibles quand on va vers la droite, nos trois chercheurs ont découvert une fonction d'une simplicité parfaite à laquelle est associé un algorithme très simple, mais dont l'arrêt ne peut pas se démontrer avec l'arithmétique de Peano, même quand on se limite à n'envisager que des nombres entiers pour la variable. Cette fonction

associe un nombre réel $M(x)$ à tout nombre réel x . Quelques symboles la définissent :

Si $x < 0$, alors $M(x) = -x$;
si $x \geq 0$, alors $M(x) = M(x - M(x - 1)) / 2$.

Il s'agit d'une définition récursive, à l'instar de la fonction factorielle définie sur les entiers naturels, que l'on notera ici $\text{fact}(n)$: si $n = 0$, alors $\text{fact}(n) = 1$, sinon $\text{fact}(n) = n \text{fact}(n - 1)$.

De telles définitions sont courantes en informatique où les langages de programmation les autorisent. Dans le cas de la fonction factorielle, on comprend bien que demander par exemple $\text{fact}(3)$ provoque l'appel de $\text{fact}(2)$, qui provoque l'appel de $\text{fact}(1)$, qui provoque l'appel de $\text{fact}(0)$, qui donne une réponse et conduit alors à la réponse pour $\text{fact}(1)$, puis pour $\text{fact}(2)$, puis pour $\text{fact}(3)$. Pour tout entier n , l'appel de $\text{fact}(n)$ conduit au résultat parce que l'ordinateur comprend la définition récursive et sait l'exploiter.

Dans le cas de la fonction M , c'est un peu plus compliqué, mais cela fonctionne aussi très bien (voir l'encadré 4). L'équipe autour de Jeff Erickson a démontré que quel que soit le nombre réel x , les appels que provoque la demande du calcul de $M(x)$ finissent par aboutir et produisent le résultat. Il n'y a jamais d'appels à l'infini qui empêcheraient le calcul de $M(x)$.

J'ai programmé cette fonction. J'ai pu calculer $M(0)$, $M(1)$, $M(2)$, mais, pour $M(3)$, malgré une optimisation soignée de mon programme, le calcul demandé ne semble pas aboutir. Quand je demande $M(3)$ à mon ordinateur, après quelques minutes, il met en marche le ventilateur de refroidissement du microprocesseur et je juge prudent d'arrêter le calcul. Le calcul devrait aboutir, c'est démontré, mais il est trop long et complexe pour ma machine. Bien que $M(4)$ provoque en théorie un calcul fini, aucun ordinateur ne le fera peut-être jamais, et si $M(4)$ devient un jour calculable réellement, ce ne sera pas le cas du calcul de $M(5)$ encore colossalement plus difficile à faire aboutir.

Définie en quelques symboles, la fonction M donne un résultat pour tout nombre x , mais la démonstration de ce bon fonctionnement exige des outils mathématiques plus puissants que ceux de l'arithmétique de Peano : l'arrêt du calcul de $M(x)$, même en ne considérant que des x entiers, est un indécidable pour Peano. Alan Turing a démontré que l'arrêt des programmes était un problème algorithmiquement indécidable, dont on déduit que certains programmes ne s'arrêtent pas, ce que l'arithmétique de Peano ne sait pas démontrer. Ici, on a un résultat du même type, d'une simplicité parfaite et qui n'est pas né de considérations logiques plus ou moins tordues, mais de l'étude de l'ensemble des nombres fusibles, une énigme simplissime de mathématiques récréatives. C'est certain maintenant, l'indécidabilité peut surgir partout! ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Nivasch, **Vidéo d'un exposé détaillé et pédagogique sur les nombres fusibles** : <http://www.youtube.com/watch?v=FjMNjMCmJP4>

J. Erickson, G. Nivasch et J. Xu, **Fusible numbers and Peano arithmetic**, LICS'2021 (Logic in Computer Science, 2021, Rome), prépublication arXiv:2003.14342, 2020.

J. Erickson, **Fusible numbers**, 2020 : <http://www.mathpuzzle.com/fusible.pdf>

Wikipédia, **Nombre ordinal**, (https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_ordinal), 2021.

Frank Morgan's Math Chat, **Burning 1-hour fuses in 45 minutes**, 1999 : <https://bit.ly/3hxyNDS>

J.-P. Delahaye, **Information, complexité et hasard** (chap. 6 : L'importance des indécidables), Hermès, 1994.

J. Paris et L. Harrington, **A mathematical incompleteness in Peano Arithmetic**, *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, vol. 90, pp. 1133-1142, 1977.

L'AUTEUR



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

LES AIGUILLES DE L'ÉVEIL

Un artiste japonais a fait d'un objet mathématique, la surface de Kuen, des sculptures très élancées à l'abstraction toute bouddhique.

Dans les années 1930, le peintre et photographe américain Man Ray, arrivé à Paris en 1921, explore à l'invitation de son ami le peintre et sculpteur allemand Max Ernst l'institut Henri-Poincaré (IHP), dédié à la recherche en mathématiques. Là, dans une vitrine poussiéreuse, ils découvrent une collection de modèles mathématiques (on en compte près de 600) en plâtre, bois, métal, papier mâché... qui ont été confectionnés afin d'aider les élèves à voir dans l'espace. Ces objets fascinent les surréalistes. Man Ray les photographie et publie ses clichés dans les *Cahiers d'art* en 1936 – où André Breton les mentionne dans son article « Crise de l'objet » – puis les peindra dans les années 1940 dans sa

série des « Équations shakespeariennes ». Max Ernst en intègre des représentations dans ses collages. L'attrait pour ces objets mathématiques ne s'est jamais démenti et, encore aujourd'hui, peintres, architectes et sculpteurs viennent les voir pour s'en inspirer.

Certains fabricants de ces modèles ont produit plusieurs collections qui ont essaimé à travers le monde. Il en est ainsi de la société allemande Martin Schilling, qui en a exporté une au Japon, à la demande du professeur de mathématiques Nakagawa Senkichi pour son enseignement à l'université de Tokyo, qui les conserve encore aujourd'hui.

C'est là que l'artiste japonais Toshimasa Kikuchi, né en 1979, chercheur

au musée de cette université et spécialiste de la restauration de sculptures bouddhiques anciennes, les a vus. Il en fait le cœur d'une série de sculptures intitulée « Formes géométriques ». Certaines sont exposées dans la rotonde du Musée national des arts asiatiques – Guimet, à Paris, à l'occasion d'une carte blanche offerte à l'artiste. Qu'y voit-on ? Sur les murs, des reproductions de photographies de Man Ray. Dans des vitrines, quelques modèles prêtés par l'IHP. Et, au centre, des sortes d'« aiguilles » géantes, fines et luisantes, de tailles variables (de 47 à 225 centimètres), flottant dans l'espace ou posées sur le sol.

En bois de *hinoki* (un cyprès japonais) recouvert d'une laque dite *urushi*





Les «aiguilles» de Toshimasa Kikuchi, inspirées de la surface de Kuen.

(d'origine végétale, elle est composée de sève de plusieurs arbres comme le... vernis du Japon *Toxicodendron vernicifluum*, anciennement appelé «sumac vénéneux»), et des pigments noirs (d'autres modèles, exposés ailleurs, sont dorés ou vermillon), elles dérivent d'un modèle mathématique particulier, une «surface de Kuen», étirée et prolongée.

Étudiée en 1884 par le mathématicien allemand Theodor Kuen, cette surface est une forme à courbure négative. Courbure négative? Une façon simplifiée de l'expliquer est d'imaginer la surface d'une selle de cheval (on parle de plan hyperbolique) sur laquelle la somme des angles de n'importe quel triangle est inférieure à 180 degrés, alors qu'elle est

supérieure dans les espaces à courbure positive comme la surface d'une sphère.

Plus précisément, la surface de Kuen dérive, après une transformation dite «de Bianchi», d'une pseudosphère, une surface de révolution où la courbure en tout point est constante et négative, par opposition à une sphère où la courbure est aussi constante, mais positive. Cette pseudosphère, nommée ainsi par le mathématicien Eugenio Beltrami, ressemble un peu à une toupie. La surface de Kuen est un peu plus complexe... son contour unique, aux lignes pures d'une extrême tension, étant difficilement rattachable à une forme connue. Toshimasa Kikuchi y retrouve la représentation de l'au-delà qu'il avait rencontrée dans la

sculpture bouddhique. De fait, en contemplant ces aiguilles si parfaites dans leur forme et leur aspect, on entrevoit ce qu'a pu ressentir Siddhartha Gautama lorsque, ayant atteint l'éveil (Bouddha signifie «l'Éveillé» en sanskrit), il est parvenu à la compréhension totale de la nature. ■

Carte blanche à Toshimasa Kikuchi, jusqu'au 4 octobre 2021, au Musée national des arts asiatiques – Guimet, 6, place d'Iéna, 75116 Paris.

Toshimasa Kikuchi - Objets Mathématiques, publié par la galerie Mingei (ISBN 978-2-9566150-3-3), 2021.

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



LES AUTEURS



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

ÉCOUTER LA LUMIÈRE

En faisant varier périodiquement la lumière éclairant un milieu matériel, on engendre l'émission d'ondes acoustiques. Découvert à la fin du XIX^e siècle, cet effet trouve des applications très modernes.

É

clairée par une lumière modulée en intensité, une simple lame de verre recouverte de noir de fumée peut émettre un son audible ! C'est l'effet photoacoustique, mis en évidence vers 1880 par l'ingénieur d'origine écossaise Alexander Graham Bell, l'inventeur le plus célèbre du téléphone : une partie de l'énergie lumineuse absorbée par l'échantillon illuminé y est convertie en énergie acoustique. Ce n'est pas qu'une curiosité de laboratoire. Depuis la fin des années 1970, avec le développement des microphones et de sources lumineuses accordables en fréquence, cet effet a suscité de multiples applications allant de la détection de gaz à l'état de traces à l'imagerie médicale à haute résolution.

Bell recherchait avec son « photo-phone » un moyen de transmettre la parole par voie aérienne. Il utilisait la lumière du soleil, dirigée par un miroir vers son dispositif expérimental. Dans ses expériences, l'intensité de cette lumière était modulée périodiquement à une fréquence acoustique (de l'ordre de 1000 hertz par exemple) par un ensemble de deux disques percés, dont l'un était mis en rotation par une pédale à pied, avant d'être focalisée, grâce à un miroir parabolique, sur un échantillon de matériau (voir l'illustration ci-dessus).

Lorsque les ouvertures des disques coïncidaient, la lumière les traversait et atteignait l'échantillon ; lorsqu'elles étaient décalées, le dispositif était opaque

et l'échantillon n'était plus éclairé. En ajoutant une espèce de stéthoscope à l'ensemble, on entendait des sons.

PAS DE SON SANS MODULATION

Avec Charles Sumner Tainter, Bell a expérimenté et testé ainsi de nombreuses substances. Première constatation : beaucoup émettent un son, dont la hauteur dépend de la fréquence de la modulation lumineuse, mais pas du matériau utilisé. Pas de modulation, pas de son. Seconde constatation : à éclairage égal, l'intensité sonore est plus élevée pour les matières colorées et noircies. C'est donc que l'absorption de la lumière est à l'origine de l'émission du son. De quelle façon ?

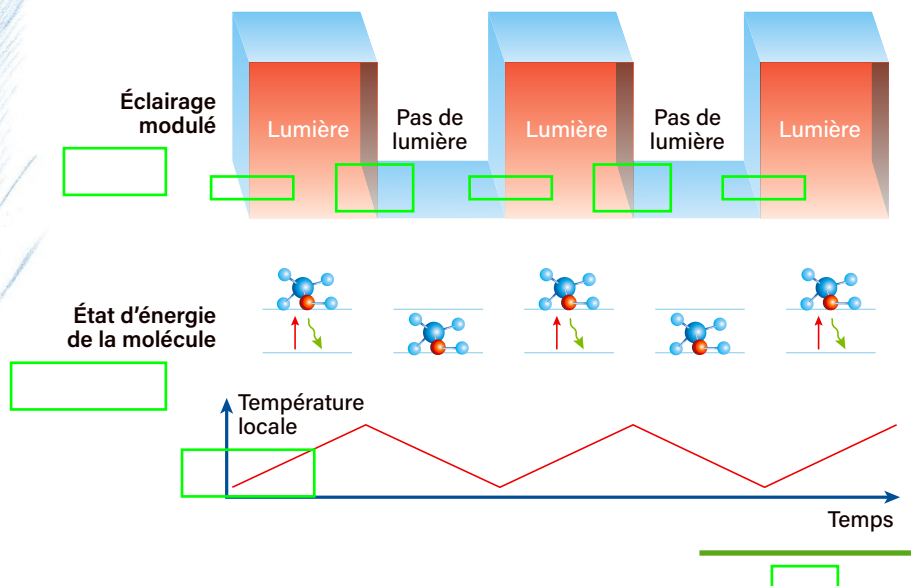


Dans cette expérience pionnière de Graham Bell, la lumière solaire est dirigée sur un couple de disques percés, dont l'un est mis en rotation par une pédale à pied. Lorsque les ouvertures des disques coïncident, la lumière passe et atteint un échantillon de matériau placé au foyer d'un miroir parabolique. Éclairé en alternance, le matériau émet un son de fréquence égale à celle de la modulation de l'éclairement.



L'EFFET PHOTOACOUSTIQUE

Supposons que l'on éclaire périodiquement un matériau à une fréquence correspondant à celle d'un son audible (entre 20 et 20 000 hertz). Lors des phases éclairées, une partie des molécules de la surface du matériau absorbent un photon et, de ce fait, passent dans un niveau d'énergie excité (flèche rouge). Ces molécules se dés excitent très vite (flèche verte) en cédant à leurs voisines leur énergie via les collisions avec elles. De ce fait, la surface s'échauffe et sa température monte. Lors des phases non éclairées, elle se refroidit. Ces variations de température se transmettent à la couche d'air en contact avec la surface. Cet air va alors se dilater et se contracter périodiquement, d'où des variations de pression qui engendrent une onde sonore de même fréquence que celle de l'éclairement. Dans les applications les plus intéressantes de l'effet photoacoustique, les variations de température (respectivement de pression) peuvent être extrêmement faibles, de l'ordre du microdegré au millidegré (respectivement du nanobar au microbar), ce qui pose des défis techniques.



Comme nous l'avons tous expérimenté, la lumière chauffe la surface des matériaux qui l'absorbent. Dans l'expérience de Bell, en l'absence de lumière, plus aucune chaleur n'est fournie au matériau, qui se refroidit donc. Dès que la lumière fait son retour, il s'échauffe de nouveau. Aussi, lorsque l'intensité de la lumière varie périodiquement à des fréquences acoustiques, il en est de même pour la température de la surface (voir l'encadré ci-dessus).

CYCLES DE TEMPÉRATURE ET DE PRESSION

L'oscillation de la température de surface fait aussi osciller la température de l'air au contact du matériau, sur une

épaisseur qui dépend de la période de la modulation. Cette couche d'air va donc périodiquement se dilater et se contracter au gré des variations de sa température et jouer le même rôle, pour l'air environnant, que les vibrations de la membrane d'un haut-parleur. Les variations de pression de cette couche d'air engendrent ainsi une onde acoustique que notre oreille ou un microphone pourront détecter.

L'un des intérêts de la photoacoustique, c'est que l'absorption de lumière n'est pas réservée aux surfaces noircies, car les molécules peuvent individuellement absorber des photons. Une molécule qui absorbe un photon passe dans un état excité, de plus haute énergie que son

état fondamental. Les états énergétiques accessibles correspondent à un changement de la configuration électronique de la molécule, de son état de vibration ou de son état de rotation. En l'absence de phénomènes de luminescence (dés excitation par émission d'un photon), ce qui est la situation la plus courante, la molécule revient très vite (en un temps de l'ordre du milliardième de seconde) dans son état fondamental par dissipation dans le milieu de l'énergie absorbée,

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



dissipation qui se fait au travers des collisions avec les molécules voisines.

Autrement dit, un échauffement local se produit autour des molécules ayant absorbé de la lumière, que celles-ci se trouvent dans un milieu gazeux, liquide ou solide. Au lieu d'advenir uniquement en surface, l'échauffement dans un gaz ou dans un milieu transparent se produit en volume, et est proportionnel à la concentration de molécules qui absorbent la lumière. Le résultat est toujours une émission de son si la lumière est modulée.

SPECTROSCOPIE ET IMAGERIE PHOTOACOUSTIQUES

Un autre intérêt de ce processus est sa sélectivité. Comme il implique une transition entre deux niveaux moléculaires d'énergie, il suffit de choisir la bonne fréquence lumineuse pour exciter préférentiellement certaines molécules. C'est particulièrement utile dans la détection de gaz à l'état de traces. Par exemple, de nombreux gaz polluants ou composés organiques volatils absorbent à certaines longueurs d'onde comprises entre 1 et 10 micromètres (dans l'infrarouge). L'amplitude de la réponse acoustique étant proportionnelle à la concentration du gaz sondé, on peut remonter à la valeur de cette dernière, indépendamment des conditions de température, de pression, de présence d'autres composés, etc.

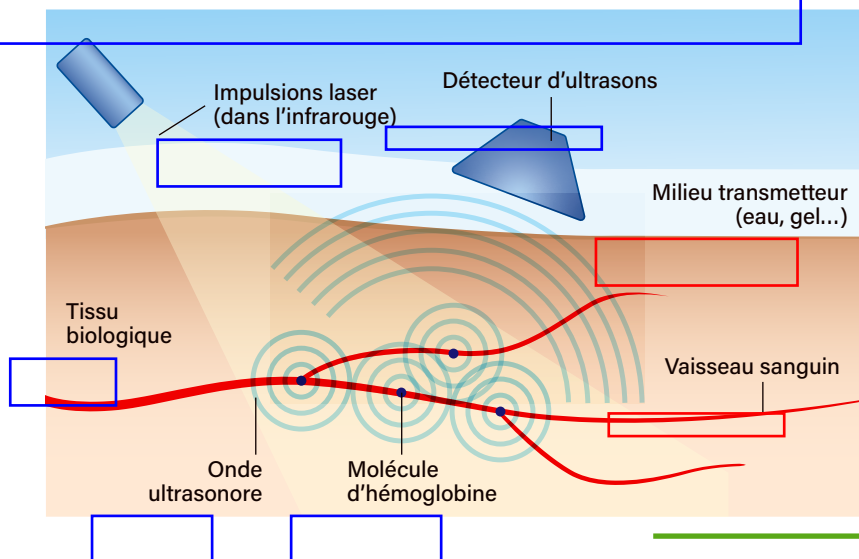
Les meilleurs dispositifs permettent ainsi de détecter dans l'air des concentrations d'éthylène ou d'hydrogène sulfuré inférieures à une partie par million. Dans le souci actuel de mieux vérifier la qualité de la ventilation, on trouve aussi désormais des détecteurs photoacoustiques de gaz carbonique. Par ailleurs, avec une source lumineuse accordable, il est possible de sonder plusieurs gaz à la fois en faisant varier la fréquence lumineuse.

Enfin, on peut inverser la démarche et étudier le spectre d'absorption lumineux d'un matériau en enregistrant sa réponse acoustique. C'est particulièrement judicieux lorsque le matériau absorbe très peu : le son qu'il émet est proportionnel à la quantité d'énergie lumineuse absorbée. Sa mesure se fait par rapport à une référence «sourde» (l'équivalent acoustique d'un fond noir), indépendamment de l'énergie lumineuse restante.

On retrouve ces avantages et d'autres encore dans un domaine très différent, celui de l'imagerie médicale (voir l'encadré ci-dessus). En effet, de nombreuses

IMAGERIE PHOTOACOUSTIQUE

L'effet photoacoustique a des applications en imagerie médicale. Si par exemple la longueur d'onde lumineuse est choisie de façon à correspondre à l'excitation des molécules d'hémoglobine, on peut visualiser les vaisseaux sanguins. Une source laser émet des impulsions lumineuses à une certaine fréquence f . En absorbant des photons et en se déséxcitant, les molécules d'hémoglobine (ici quatre sont pointées) échauffent leur environnement immédiat lors des phases éclairées, d'où une alternance de dilatations et de compressions qui engendre l'émission d'ondes acoustiques de fréquence f . Ces ondes, qui se propagent sans déformation dans les tissus mous, sont enregistrées par des capteurs acoustiques. L'analyse des signaux permet alors de construire une image.



molécules naturellement présentes dans le corps humain ont une réponse photoacoustique forte, ce qui évite l'injection des «agents de contraste» utilisés dans d'autres techniques d'imagerie. C'est, par exemple, le cas de l'hémoglobine ; on obtient ainsi, avec la photoacoustique, des «images» de bonne résolution de la vascularisation sanguine, ce qui faciliterait le diagnostic précoce de certaines tumeurs (qui s'accompagnent de la création de nouveaux vaisseaux sanguins).

L'excellente qualité de ces images tient aussi au fait que les tissus mous du corps diffusent très peu les ondes acoustiques, contrairement au cas des ondes lumineuses. Grâce à cette transparence, les ondes acoustiques émises par les zones qui absorbent la lumière se propagent dans toutes les directions sans être déformées. En disposant un réseau de capteurs qui recueillent ces ondes à différents instants, il est possible de remonter à l'origine de l'émission de ces ondes et de reconstruire ensuite les images tridimensionnelles correspondantes : tel est le principe de la tomographie photoacoustique. Une bien belle descendance pour le photophone, invention que Bell tenait pour plus importante encore que le téléphone... ■

BIBLIOGRAPHIE

- S. Vítov et al., **Imagerie photoacoustique biomédicale**, *Photoniques*, n° 94, pp. 24-29, 2018.
- M. Duquesnoy et al., **Détection de gaz par spectroscopie photoacoustique : principe et mise en œuvre**, *Photoniques*, n° 94, pp. 38-44, 2018.
- A. C. Tam, **Applications of photoacoustic sensing techniques**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 58(2), pp. 381-431, 1986.

ABONNEZ-VOUS À

Pour la
Science

OFFRE RENTRÉE 1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

10 € DE RÉDUCTION

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

69€

Au lieu de 114,40€

89€

Au lieu de 174,40€

29 %

de réduction *

40 %

de réduction *

49 %

de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnements Pour la Science – 56, rue du Rocher – 75008 Paris – Courriel : serviceclients@groupepouirlascience.fr

PAG21REN



OUI, je m'abonne
pour 1 an à

Pour la
Science

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale)

@

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science



Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur
boutique.groupepouirlascience.fr/offres-rentree-PLS

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

69€

Au lieu de 114,40€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

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

89€

Au lieu de 174,40€

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

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

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

L'AUTEUR



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

QUATRE BEAUX PIGEONS POUR LE PRIX D'UN

Le goura couronné est un oiseau emblématique de la Nouvelle-Guinée. Or ce n'est pas une, mais quatre espèces qui peuplent l'île. On commence à en comprendre l'histoire.

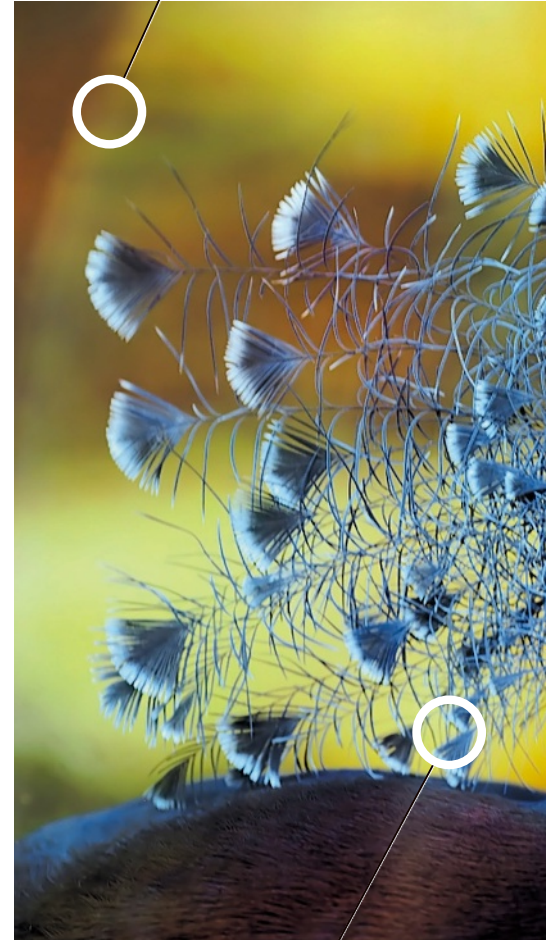
E

n 1764, le zoologiste allemand Peter Pallas découvrit, dans les collections de La Haye, un oiseau étonnant qu'il nomma *Columba cristata*, c'est-à-dire «pigeon crêté». Ce dernier provenait de l'ouest de la Nouvelle-Guinée, alors colonie néerlandaise. Même si, au début du XIX^e siècle, son nom est devenu *Goura cristata*, il appartient bel et bien à la famille des columbidés, qui rassemble, entre autres, pigeons, tourterelles, mais aussi des oiseaux disparus récemment comme le dodo, le célèbre dronte de Maurice (*Raphus cucullatus*). Un siècle plus tard, trois ornithologistes ont scindé successivement l'espèce en plusieurs taxons, soit

sous un genre différent, soit comme sous-espèce. Qu'importe, cela prouvait qu'il existait des différences anatomiques significatives. Mais il fallut attendre 2014 pour que d'autres ornithologistes – l'Espagnol Josep del Hoyo et le Britannique Nigel Collar – considèrent qu'en Nouvelle-Guinée il existe non pas une, mais quatre espèces de goura, distribuées dans les forêts tropicales de basse altitude bordant l'île : le goura couronné (*G. cristata*), le goura de Scheepmaker (*G. scheepmakeri*), le goura de Sclater (*G. sclaterii*) et le goura de Victoria (*G. victoria*).

Bien que convaincantes, les différences entre ces espèces portaient surtout

Surtout actif au sol pour se nourrir, l'oiseau se perche dans la cime d'un arbre pour dormir.



Cette espèce est la plus commune du genre *Goura*, endémique de la Nouvelle-Guinée. C'est aussi la plus volumineuse.



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

EN CHIFFRES

70 CM

Les gouras sont de gros pigeons mesurant en moyenne quelque 70 cm (entre 66 et 85 cm selon les espèces) et pesant 2 à 3,4 kg. Plus imposants que notre pigeon biset (30 cm, 0,3 kg), ils paraissent petits à côté de leur cousin le dodo, du haut de ses 1 m et 10 kg.

60 KM

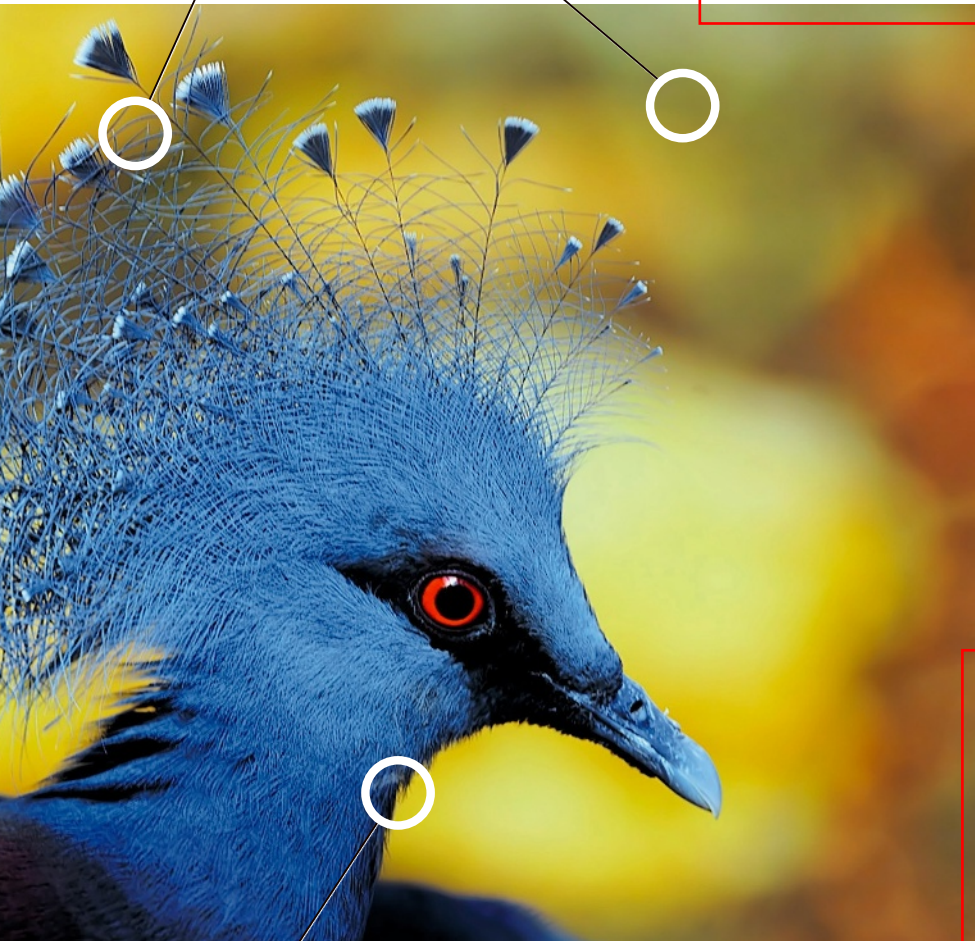
L'isthme du cou de l'oiseau, qui relie la pointe nord-ouest de la Nouvelle-Guinée au reste de l'île, est un couloir de 60 km de large, avec une altitude de 160 mètres maximum.

8,6 %

La Nouvelle-Guinée compte à elle seule 8,6 % des espèces d'oiseaux (893, dont 101 endémiques), alors qu'elle ne représente que 0,75 % de la surface des terres émergées (786 000 km²). Par comparaison, la France métropolitaine (551 695 km²) reçoit 616 espèces d'oiseaux, dont une seule endémique, la sittelle corse (*Sitta whiteheadi*), et l'Europe, 976 espèces.

Pour la couvaison, il construit un nid imposant, souvent au cœur d'une fougère arborescente.

Il vit dans des forêts denses de plaine, non loin des côtes.



On distingue deux sous-espèces, l'une vivant sur l'île principale, l'autre sur les îles Yapen et Biak, au nord de cette dernière.



Goura de Victoria
(*Goura victoria*)

Taille: entre 75 et 85 cm
Poids: jusqu'à 3,4 kg

sur la taille et la coloration du plumage. À l'ère de la génomique, ces critères restent un peu légers. Aussi, en 2018, Guillaume Besnard et Christophe Thébaud, à l'université de Toulouse, ont réuni une équipe afin de compléter ces données par une analyse moléculaire. Bien leur en a pris, car cette enquête leur a permis de reconstituer l'histoire de ces magnifiques pigeons. Une histoire assez inattendue...

QUATRE ESPÈCES DE GOURAS

Pour son étude phylogénétique, l'équipe a fait un choix particulièrement judicieux des spécimens – de nombreux

gouras et des espèces réputées évolutivement proches –, et ce malgré les difficultés de l'échantillonnage. En effet, la plupart étant des animaux protégés et l'île étant par ailleurs immense, l'équipe a dû se rabattre, pour beaucoup, sur des exemplaires de musée, au risque d'obtenir de l'ADN dégradé. Ses analyses ont confirmé l'étude anatomique: les quatre espèces de gouras identifiées sur des critères morphologiques le sont aussi sur des critères moléculaires (voir l'encadré page 95).

Comme souvent en science, résoudre un problème en pose bien d'autres. Les quatre espèces se regroupent en deux paires, mais inattendues d'après leur distribution sur le terrain. En effet, dans le sud de la Nouvelle-Guinée, les territoires des gouras de Scheepmaker et de Sclater se chevauchent. Dans le nord, les gouras couronnés et de Victoria font de même. Dans de tels cas, le type de spéciation le plus vraisemblable est la vicariance, c'est-à-dire la séparation, à la suite de la mise en place de barrières écologiques, de populations ancestrales qui évoluent alors indépendamment. On pensait donc que les espèces proches géographiquement le seraient aussi d'un point de vue évolutif. Mais non! Les gouras de Scheepmaker et

de Victoria apparaissent groupes frères, de même que les gouras de Sclater et couronné. Comment expliquer cette étrangeté?

Par chance, les phylogénies moléculaires suggèrent des dates de divergence des lignées: la première séparation entre les gouras date de 5,7 millions d'années. Quant à la divergence entre les oiseaux de Nouvelle-Guinée et le manuméa des îles Samoa, et à celle qui a séparé le groupe contenant le dodo et la lignée des gouras, elles s'inscrivent dans un laps de temps compris entre 27 et 22 millions d'années. Or ces dates parlent aux géologues de la Nouvelle-Guinée.

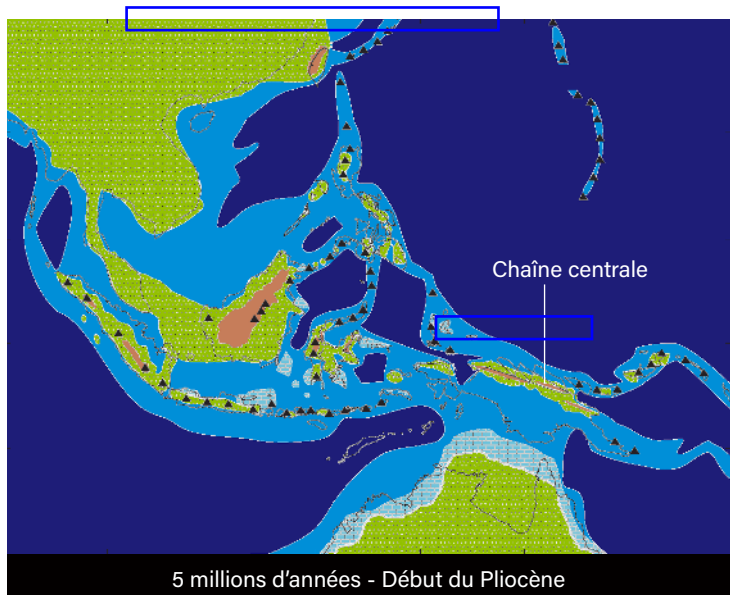
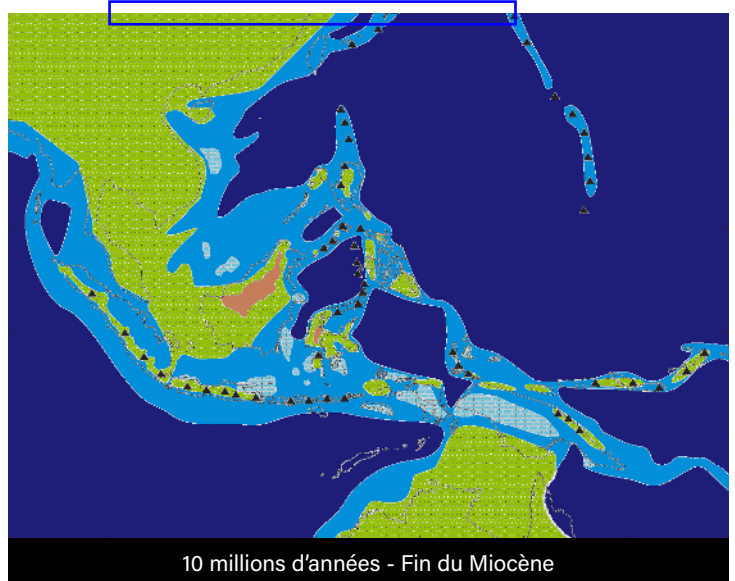
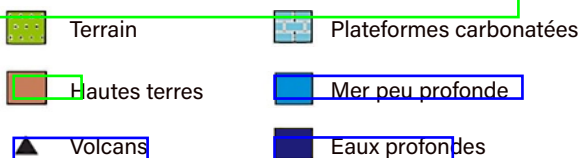
LA NOUVELLE-GUINÉE, L'ÎLE-OISEAU

La carte de l'île ressemble à un oiseau: la péninsule de Doberai, à l'extrémité nord-ouest, est aussi dénommée «péninsule de la tête de l'oiseau», et celle de Papouasie, à l'extrémité sud-est, «péninsule de la queue de l'oiseau». La géographie physique de l'île se décrit alors simplement. La tête de l'oiseau est un massif montagneux rattaché au corps par l'«isthme du cou de l'oiseau». Une barrière montagneuse, appelée «Chaîne centrale», rivalise en hauteur avec les Alpes et s'étend du cou à la queue de l'oiseau. Sur 1600 kilomètres, elle limite au sud et au nord deux gigantesques plaines de forêts tropicales, de marécages et de savanes. Le goura de Victoria peuple la plaine nord; sur la plaine sud, on trouve le goura de Sclater vers l'ouest et celui de Scheepmaker vers l'est, jusqu'à la queue de l'oiseau. Le goura couronné se réserve la tête de l'oiseau. Ainsi les gouras forment un cercle autour de la Chaîne centrale.

Diverses équipes ont daté avec une excellente précision les événements géologiques majeurs qui ont façonné l'île. La plaque tectonique australienne migre vers le nord-est. Il y a une vingtaine de millions d'années, elle est venue buter contre l'Asie du Sud-Est, ce qui a provoqué, il y a environ 5 millions d'années, l'érection de la Chaîne centrale (voir la figure ci-contre). Or, au cours de cette migration, le climat de l'Australie a bien changé, passant de tropical à désertique. On postule que les oiseaux ont tenté de chercher des refuges, c'est-à-dire des zones où ils trouvaient le climat auquel ils étaient adaptés. Et certains sont allés vers les îles Samoa et Tonga, à l'est, et Mascareignes, à l'ouest. Avec d'autres espèces, les gouras sont allés en Nouvelle-Guinée. Mais

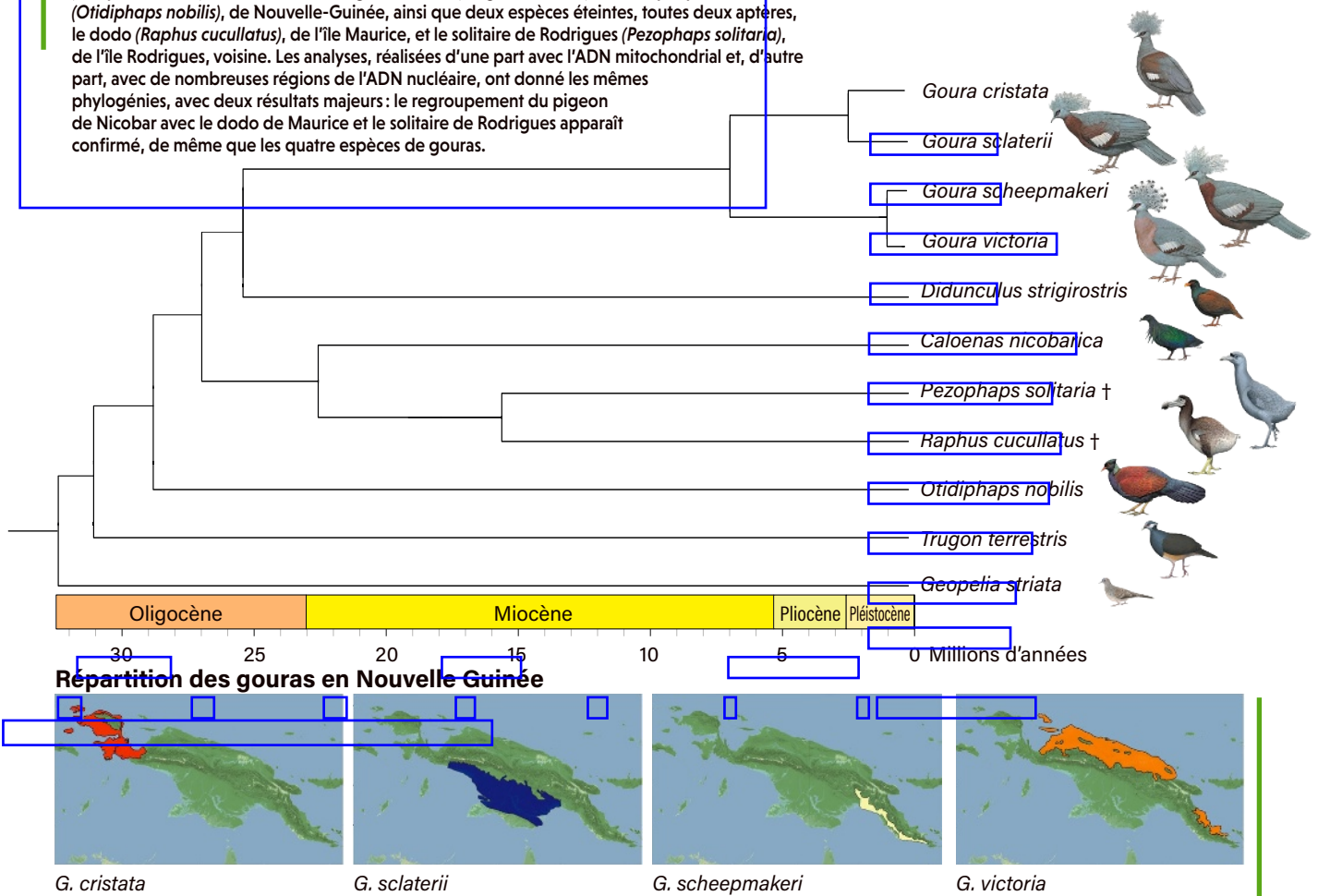
FORMATION DE LA NOUVELLE-GUINÉE

La migration de la plaque tectonique australienne vers le nord-est a façonné la Nouvelle-Guinée. En butant contre l'Asie du Sud-Est il y a une vingtaine de millions d'années, elle a conduit à la formation de l'île et à l'érection de sa chaîne de montagnes, il y a environ 5 millions d'années.



DES COLUMBIDÉS AUX GOURAS

Pour étudier la phylogénie des gouras, l'équipe de Guillaume Besnard et Christophe Thébaud a analysé le génome de 39 gouras et de proches parents : le manumée (*Didunculus strigirostris*), des îles Samoa ; le pigeon de Nicobar (*Caloenas nicobarica*), des îles Salomon ; la géopélie zébrée (*Geopelia striata*), d'Indonésie ; le trugon terrestre (*Trugon terrestris*) et l'otidiphaps noble (*Otidiphaps nobilis*), de Nouvelle-Guinée, ainsi que deux espèces éteintes, toutes deux aptères, le dodo (*Raphus cucullatus*), de l'île Maurice, et le solitaire de Rodrigues (*Pezophaps solitaria*), de l'île Rodrigues, voisine. Les analyses, réalisées d'une part avec l'ADN mitochondrial et, d'autre part, avec de nombreuses régions de l'ADN nucléaire, ont donné les mêmes phylogénies, avec deux résultats majeurs : le regroupement du pigeon de Nicobar avec le dodo de Maurice et le solitaire de Rodrigues apparaît confirmé, de même que les quatre espèces de gouras.



les mouvements tectoniques ont entraîné la surrection de la Chaîne centrale, établissant une barrière entre les plaines nord et sud. C'est à ce moment que les gouras ont entamé leurs spéciations.

Mais comment expliquer la curieuse répartition des espèces ? Les endroits où les territoires se chevauchent sont particulièrement intéressants. À l'ouest, les territoires du goura couronné et de celui de Victoria se touchent au niveau de l'isthme du cou de l'oiseau. Au sud-est, ceux des gouras de Sclater et de Scheepmaker se chevauchent au niveau de la dépression d'Aure. Or ces deux zones ont longtemps été des frontières géographiques naturelles, car immergées, jusqu'à ce qu'elles deviennent des zones de passage, le cou de l'oiseau se formant et la dépression d'Aure se remplissant vraisemblablement il y a 3 millions d'années environ.

Avant cela, les quatre espèces étaient donc sur des territoires bien isolés. On a ainsi affaire à des zones de suture, c'est-à-dire des aires où se chevauchent des faunes autrefois séparées. Récemment, Jared Diamond, de l'université de Californie à Los Angeles, et ses collègues ont observé 178 espèces d'oiseaux présentes dans l'isthme du cou de l'oiseau. Résultat : la région apparaît comme une double zone de suture, où se rencontrent non seulement des faunes de la tête et du corps de l'oiseau, mais aussi des oiseaux des plaines nord et sud qui, en dehors de l'isthme, sont séparés par la Chaîne centrale. Mais rien n'est simple : d'anciennes migrations séparées ne sont pas exclues et il reste encore du travail pour comprendre précisément les mécanismes évolutifs en action dans cette île si complexe. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Diamond et al.,
An avifaunal double
suture zone at the
Bird's Neck Isthmus
of New Guinea, *Wilson
J. Ornithol.*, vol. 131(3),
pp. 435-458, 2019

J. Bruxaux et al.,
Recovering the
evolutionary history
of crowned pigeons
(Columbidae : *Goura*) :
Implications for the
biogeography and
conservation of New
Guinean lowland birds,
Mol. Phyl. Evol., vol. 120,
pp. 248-258, 2018.

L'AUTEUR



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

LE GOÛT DE L'OIE RÔTIE

Des chimistes ont identifié les molécules spécifiques
de la délicieuse oie polonaise nourrie à l'avoine.

On dit que certains chasseurs gourmands savent reconnaître, en la dégustant, la patte du perdreau sur laquelle l'animal dort. Est-ce possible ? Les analyses semblent le confirmer... sur des oies.

En Pologne, l'oie White Koluda est un produit d'exportation essentiel du pays, avec une production annuelle de 40 000 tonnes. Cette variété d'oie a fait l'objet d'une sélection stricte et cette volaille a la particularité d'être engraisée à l'avoine. On sait que l'alimentation des animaux contribue à leur goût, mais il s'agit là d'appréciations sensorielles, qui ne renseignent pas sur l'origine moléculaire des goûts. Aussi l'équipe de Robert Gasior, du Centre polonais de recherches animales, a-t-elle mis en œuvre des méthodes d'analyses par chromatographie en phase gazeuse couplée à de la spectrométrie de masse et de l'olfactométrie pour identifier les composés odorants de la cuisse d'oie rôtie (*J. Agric. Food Chem.*, vol. 69(21), pp. 5986-5996, 2021).

On connaît bien les principaux composés responsables de la partie olfactive du goût des viandes cuites. Souvent, leurs molécules comportent des atomes d'azote ou de soufre, mais il y a aussi des composés d'odeur douce, dérivés d'acides aminés, et l'on détecte même de la vanilline, la molécule essentielle de l'odeur de vanille.

L'étude polonaise visait à identifier les composés odorants et à déterminer ceux qui sont olfactivement les plus intenses. C'est pourquoi Robert Gasior et ses collègues ont d'abord prolongé leurs analyses initiales par des estimations des «valeurs d'activité odorante», c'est-à-dire des mesures de seuils de perception (un composé ne sera perçu que si sa quantité est

On a identifié trente
composés odorants
principaux,
et spécifiques, dans
les chairs de l'oie rôtie.

supérieure au seuil de perception). Puis ils ont effectué des évaluations sensorielles en recombinaison des composés analysés dans des matrices inodores, omettant certains des composés selon les échantillons, afin d'identifier les effets olfactifs particuliers de chacun d'eux en mélange. Les jurés étaient entraînés à reconnaître le goût spécifique de certains composés.

Ainsi, trente composés odorants seraient responsables du goût de la cuisse d'oie rôtie. Certains sont tout à fait originaux, tels la gamma-octalactone, la delta-octalactone, la delta-décalactone, le phényléthanol, le pipéronal et le phényléthanthiol. Les principaux, également présents dans d'autres viandes cuites, sont le 2-furfurylthiol, le 2-acétyl-2-thiazoline, la 1-octène-3-one, le 2-phényléthanthiol, le 4,5-diméthyl-3-hydroxy-2(5H)-furanone, le 4-hydroxy-2,5-diméthyl-3(2H)-furanone, le (E,E)-2,4-decadiénal, le 2-acétyl-1-pyrroline et le 3-(méthylthio)propanal.

La liste de composés est une longue litanie qui détermine, au moins en partie, le goût de l'oie rôtie. Elle montre que des composés isolés ne disent pas grand-chose des odeurs : par exemple, le 1-octène-3-one est présent dans l'odeur des champignons, mais dans l'oie rôtie il ne sent pas ainsi. C'est une leçon pour qui veut composer des odeurs avec des

composés purs. Certes, les analyses de l'oie rôtie s'arrêtent à la composante odorante du goût, alors que les composantes sapides et texturales sont essentielles ; mais il faut bien commencer quelque part la caractérisation. On attend maintenant les analyses de la patte du perdreau ! ■



OIE FARCIE ET RÔTIE, SANS TROP DE GRAISSE

- 1 Préparer une oie et la farcir avec une farce faite de son foie, de persil, d'échalotes, de mie de pain trempée dans du lait, de sel et de poivre, avec un peu de cognac.
- 2 Enfourner quelques minutes à 250 °C, afin de produire des composés odorants donnant un goût cuit, et détruire les microorganismes pathogènes.
- 3 Ajouter un tiers de litre de vin blanc (l'atmosphère humide évitera aux chairs de s'assécher), et cuire pendant plusieurs heures à 65 °C afin de donner le temps à la graisse de fondre, tandis que les chairs restent tendres et moelleuses.
- 4 Vider le liquide, le mettre au grand froid, puis séparer la graisse figée. Réduire la partie aqueuse dégraissée du jus de cuisson en la faisant bouillir, jusqu'à obtenir une consistance sirupeuse. En arroser l'oie.
- 5 Remettre à four très chaud pour produire un extérieur bruni et croustillant.

ABONNEZ-VOUS À

Pour la
Science

OFFRE RENTRÉE

DURÉE
LIBRE

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

5,75€
PAR MOIS

7,40€
PAR MOIS

Au lieu de
6,50€
par mois

Au lieu de
8,20€
par mois

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnements Pour la Science - 56, rue du Rocher - 75008 Paris - Courriel : serviceclients@groupepouirlascience.fr

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

PAG21REN

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

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° papier
par an

4,90€
PAR MOIS

1-F-PAP-P-VPT-4,9€

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

• 12 n° papier par an
• 4 Hors-série papier par an

5,75€
PAR MOIS

1-F-HSPAP-P-3PVT-5,75€

☐ FORMULE INTÉGRALE

• 12 n° du magazine
(papier et numérique) par an
• 4 Hors-série (papier et numérique) par an
• Accès illimité aux contenus en ligne

7,40€
PAR MOIS

1-F-INT-P-3PVT-7,4€

2/ Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tel. :

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

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

3/ Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

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

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepouirlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

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

4/ MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

p.68

90

Grâce à un nouveau dispositif qui interprète les signaux de son cerveau lorsqu'il s'imagine en train d'écrire à la main, un patient tétraplégique est capable d'écrire par la pensée à une vitesse de 90 caractères par minute.

p.20

Seules les négociations de la COP15 sur la Convention sur la diversité biologique menées en présence des intéressés ont une chance d'aboutir. C'est une des leçons de la pandémie.

CATHERINE AUBERTIN économiste de l'environnement à l'IRD

p.58

523

Entre 2010 et 2015, la population de lions d'Asie s'est accrue de 27% dans la péninsule de Gir, en Inde. Elle a atteint 523 individus, grâce notamment à l'augmentation des aires protégées. En 2018, des groupes de 30 à 40 lions ont été trouvés dans la région.

p.46

490 MILLIONS

Dans l'Univers primordial, sous l'effet de la pression exercée par les photons, la matière ordinaire s'est distribuée sous la forme de coquilles centrées sur des surdensités de matière noire. Quand les photons ont cessé d'agir, vers 380 000 ans après le Big Bang, les coquilles se sont figées : leur rayon de 490 millions d'années-lumière est devenu un étalon pour cartographier l'Univers.

p.86

SURFACE DE KUEN

Étudiée en 1884 par le mathématicien allemand Theodor Kuen, cette forme dérive d'une pseudosphère, une surface de révolution où la courbure en tout point est négative (la somme des angles de tout triangle y est inférieure à 180 degrés, comme sur une selle de cheval) et constante. Elle ressemble à une étrange toupie.

p.12

180 000

À ce jour, au moyen de diverses techniques comme la cristallographie par rayons X, la résonance magnétique nucléaire ou la microscopie électronique, les scientifiques ont déterminé les structures tridimensionnelles d'environ 180 000 protéines. C'est encore peu comparé aux centaines de millions de protéines dont on connaît la séquence d'acides aminés.

Nathalie Cabrol dirige le Centre de recherche Carl Sagan de l'Institut Seti aux États-Unis.

Cette organisation scientifique cherche à comprendre et expliquer l'origine de la vie dans l'Univers.

La chercheuse évoque avec ses invités la quête de la vie dans des milieux extrêmes, sur Terre et dans l'espace, et ouvre le débat autour des questions séculaires: y a-t-il une vie au-delà de la Terre? Qu'est-ce que la vie?

Accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire
Informations et réservation: cite-sciences.fr

AVEC LE SOUTIEN DE 

EN PARTENARIAT AVEC 

cité

sciences
et industrie

planète plastique

tables rondes, animations

— 25 et 26 septembre
de 14h30 à 18h

voyage aux frontières de la vie

carte blanche à l'astrobiologiste
Nathalie Cabrol

— 1^{er} octobre à 19h

cité

sciences
et industrie

*Dans le cadre de la Semaine européenne
du développement durable 2021*

25 septembre

• Courtes interventions:

**Microplastiques et nanoplastiques dans l'eau -
Et dans l'air? - Les additifs relargués par les plastiques**

• Table ronde: **Plastiques: notre plus belle addiction?**
Serait-on accro aux plastiques? Comprendre notre
histoire et notre relationnel à ces matières incroyables
semble crucial au vue de la situation.

Avec notamment: **Christine Gandouin**, AQ(T)UA,
animatrice du groupe de travail plastiques de l'Astée;
Nathalie Gontard, directrice de recherche à l'Inra.

26 septembre

• Courtes interventions:

**Le recyclage - L'enfouissement et la décharge
en plein air - La revalorisation**

• Table ronde: **Plastiques: un SAV à repenser?**

Avec: **Philippe Bolo**, député du Maine et Loire;
Mario Bonin, juriste, droit de l'environnement, IRD;
Sylvie Fanchette, directrice de recherche, IRD;
Christine Gandouin, AQ(T)UA, animatrice du groupe
de travail plastiques de l'Astée; **Cyrille Harpet**, anthropologue,
EHESP.

Accès gratuit sur réservation obligatoire
ou en numérique suivant la situation sanitaire
Informations et réservation: cite-sciences.fr

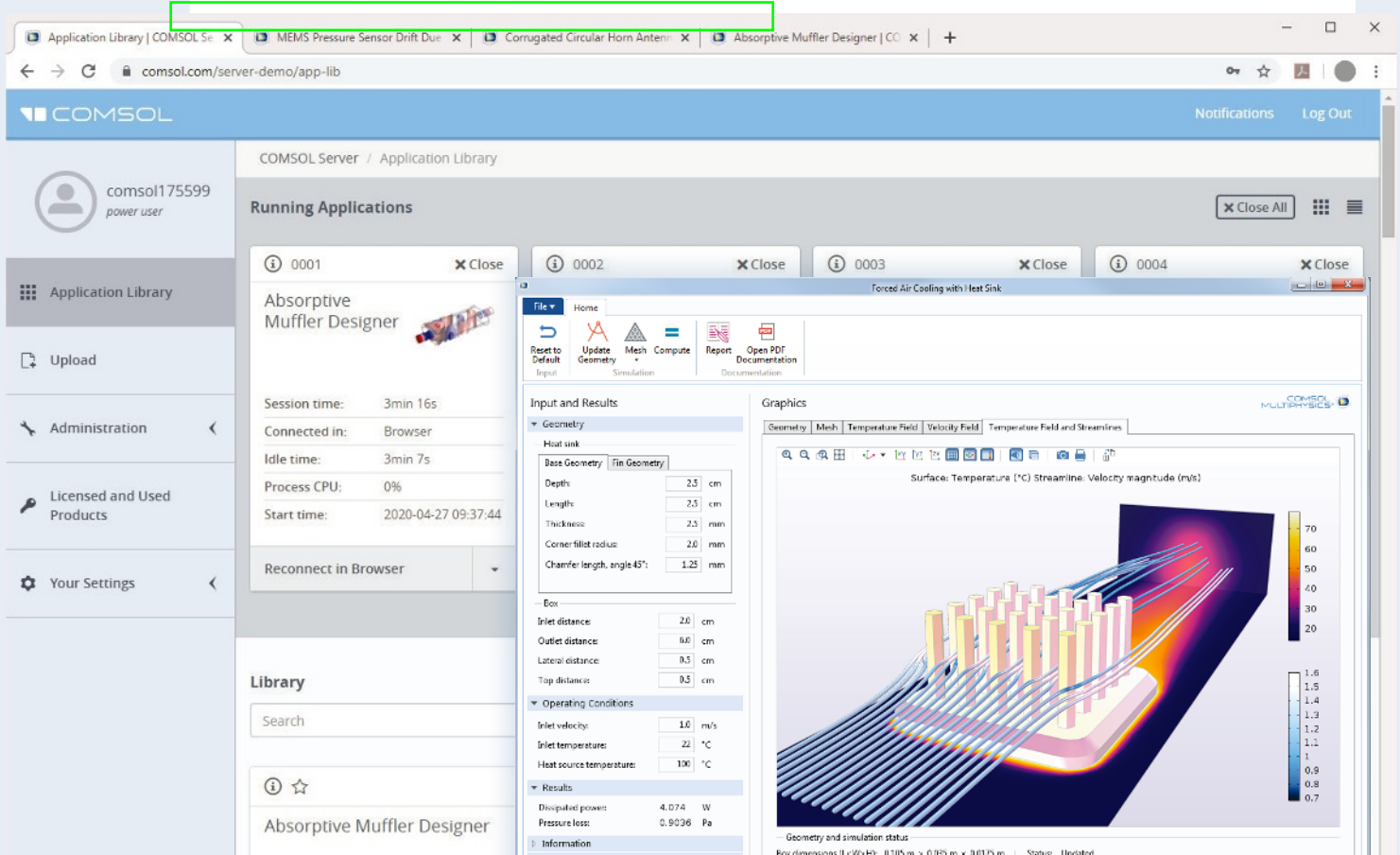
AVEC LE SOUTIEN DE 

ÉTUDE DE CAS

Accélérez et améliorez le développement de vos produits.

Les ingénieurs et les chercheurs de l'industrie accélèrent le développement de produits en créant des applications de simulation numérique et en les déployant au sein de leurs organisations. COMSOL Multiphysics® vous permet de créer des applications spécialisées et COMSOL Server™ et COMSOL Compiler™ vous aident à les distribuer aux bons collaborateurs et au bon moment dans votre cycle de développement de produits.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/product-development



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.