POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

MATHÉMATIQUES
DESSINER UN ÉLÉPHANT AVEC... UN SEUL NOMBRE !

ASTRONOMIE
ELT : LE PLUS GRAND TÉLESCOPE SERA EUROPÉEN

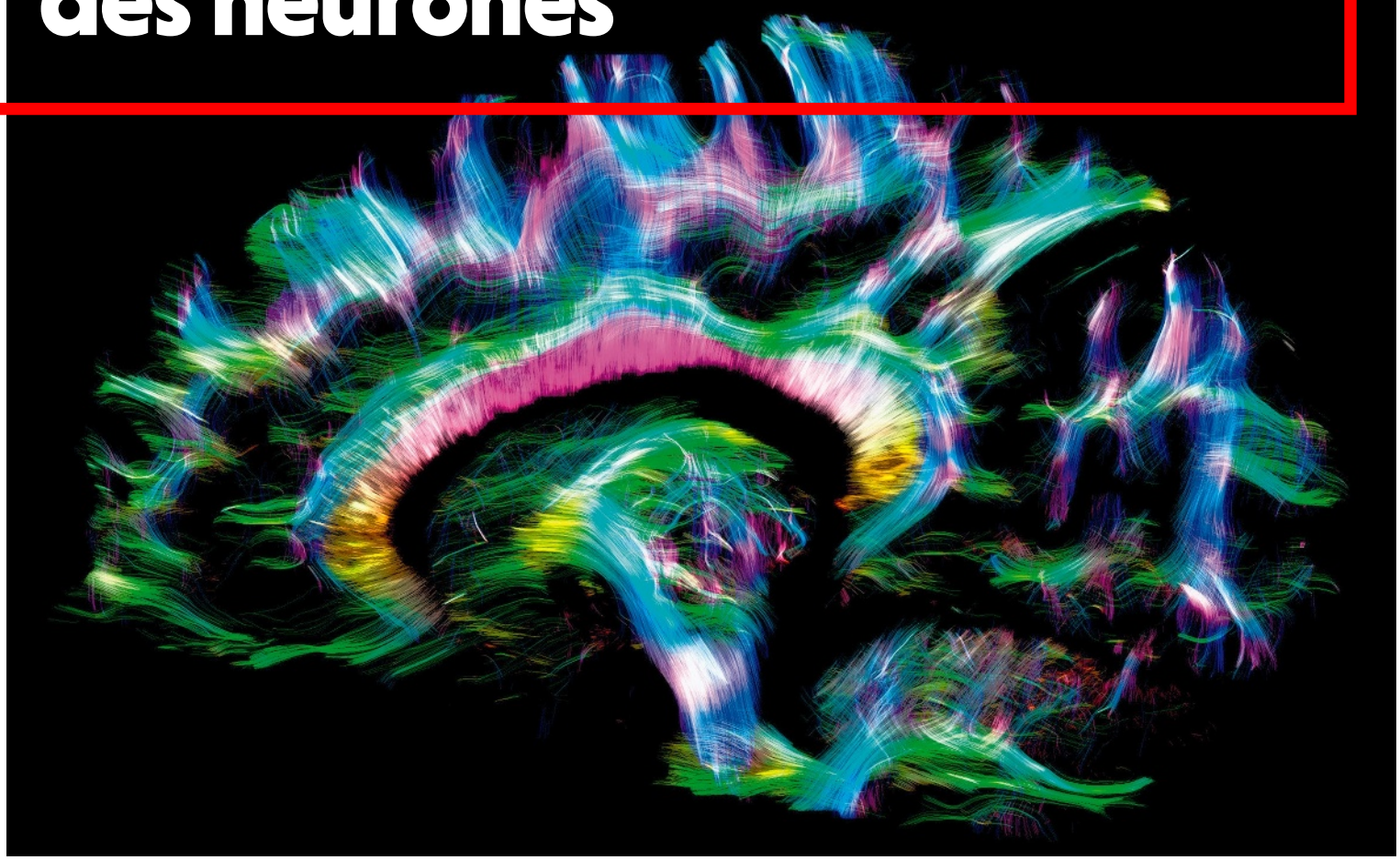
AGRONOMIE
COMMENT SAUVER LA DIVERSITÉ DES RIZ INDIENS ?

M 02687 - 511 - F: [illegible] - RD

MAI 2020
N° 511

APPRENTISSAGE ET MÉMOIRE

La myéline, alliée inattendue des neurones



BEL : 7,6 € - CAN : 11,6 CAD - DOM/S : 7,7 € - Réunion - TUN/S : 9 TND

ALLIANCE URGENCES

UNIS FACE À L'URGENCE

© Toby Madden pour Action contre la Faim

URGENCE CORONAVIRUS

6 ONG 1 CLIC 1 DON

ALLIANCEURGENCES.ORG

Pour venir en aide aux victimes en un seul don, Alliance Urgences rassemble les forces de 6 ONG.

ACTION CONTRE LA FAIM

care

handicap international

MÉDECINS DU MONDE

PLAN INTERNATIONAL
Avec et pour les enfants

SOLIDARITÉS INTERNATIONAL

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédacteur en chef adjoint: Jean-Baptiste Gordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Lucas Gierczak

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

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Conception graphique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilagra
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Antoine Bérut, José Bico, Maud Bruguière, Silvana Condemi, René Cuillierier, Matthieu Lanneville, Étienne Reyssat, Vincent Wieczny

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements – Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

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

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Trouvard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Acting editor in chief: Curtis Brainard
Executive vice president: Michael Florek

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

Origine du papier: Autriche
Taux de fibres recyclées: 20 %
Impact sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne

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

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

CORONABOUSCULÉS

Depuis la mi-mars, une grande partie de la population, en France et ailleurs, est confinée à domicile à cause de la pandémie de Covid-19. Cette situation inédite touche aussi l'équipe de *Pour la Science* – laquelle a dû s'organiser rapidement, en mettant à profit les techniques de télécommunication disponibles, pour continuer à assurer, à distance, l'élaboration du magazine.

Comme d'habitude, nous nous efforçons ainsi de maintenir le lien entre chercheurs et passionnés de sciences et pour partager les connaissances produites par la recherche. Un partage dont l'importance n'a jamais été aussi flagrante qu'avec la pandémie actuelle. En particulier, pour suivre l'actualité biomédicale, notre équipe s'est pleinement mobilisée afin de proposer en ligne et en accès libre à tous, sur www.pourlascience.fr, de nombreux articles sur les développements les plus récents relatifs à l'épidémie de Covid-19.

En raison de la vitesse à laquelle cette actualité scientifique évolue, le présent numéro imprimé ne traite du contexte épidémique qu'à travers trois rubriques (*voir pages 16, 18 et 64-66*). Par ailleurs, pour faire face aux difficultés actuelles, nous nous sommes vus contraints, exceptionnellement, de réduire la pagination. Nous vous remercions de votre compréhension et de votre fidélité.

Si, de façon bien compréhensible, la pandémie occupe une place prépondérante dans les esprits, la science dans sa diversité continue de progresser. La lecture de ce numéro vous permettra, une fois de plus, de vous échapper du quotidien et de prendre connaissance de quelques avancées marquantes. En particulier, deux articles (*voir pages 20 à 31*) détaillent une grande découverte récente sur le cerveau: le rôle capital que joue la myéline, ou «substance blanche», dans les processus d'apprentissage et de mémorisation, en modulant la vitesse des influx nerveux entre neurones. Mais vous pourrez aussi apprendre à dessiner à peu près n'importe quoi à l'aide d'un seul paramètre, voir à quoi ressemblera le plus grand télescope optique du monde, ou comprendre comment les oiseaux chanteurs ont conquis la planète.

Très bonne lecture... et santé! ■

SOMMAIRE

N° 511 /
Mai 2020

ACTUALITÉS

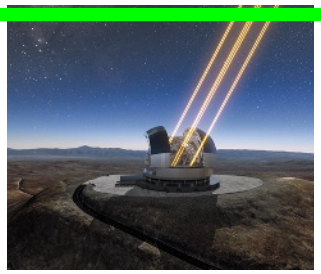
P. 6
ÉCHOS DES LABO
- Formation de la Lune: l'hypothèse de l'impact renforcé
- Grippe et surinfection: une histoire de microbiote
- Nous sommes bien issus de nombreux métissages
- Des transistors supraconducteurs
- Des chromosomes clandestins chez les plantes à fleurs
- Des doigts créés par une goutte
- Une constante à l'épreuve des trous noirs
- Le prix Abel 2020

P. 14
LES LIVRES DU MOIS

P. 16
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Covid-19: une surveillance des malades efficace?
Gilles Dowek

P. 18
QUESTIONS DE CONFIANCE
De la mesure en toute crise... sanitaire!
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 32
ASTRONOMIE
ELT : LE PLUS GRAND ŒIL DE LA PLANÈTE
Xavier Barcons, Juan Carlos González Herrero et Augustín Sánchez Lavega

Du Système solaire aux premières étoiles de l'Univers, le télescope géant européen *ELT* observera dans quelques années le cosmos avec un luxe de détails sans précédent.

P. 52
SCIENCE & FICTION
IMPACT! LA MENACE VENUE DE L'ESPACE
Jean-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

Elles ont mis fin au règne des dinosaures et détruisent des villes et des civilisations dans les films catastrophes. Mais avons-nous les moyens d'empêcher que l'une de ces météorites géantes entre en collision avec la Terre?

P. 42
AGRONOMIE
SAUVER LES RIZ TRADITIONNELS INDIENS
Debal Deb

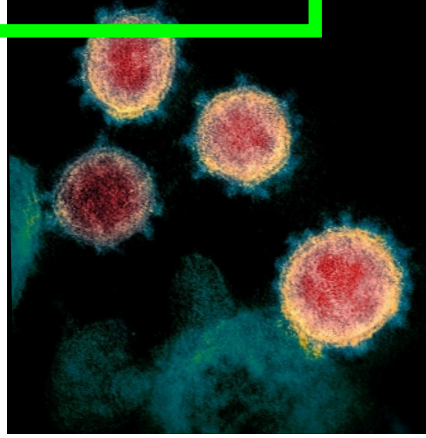
En Inde, certaines variétés indigènes de riz résistent aux inondations, aux sécheresses et à moult autres catastrophes. Reste à en relancer la culture...

COVID-19

RETROUVEZ TOUS NOS ARTICLES RELATIFS À LA PANDEMIE DE COVID-19

EN ACCÈS LIBRE SUR NOTRE SITE INTERNET :

WWW.POURLASCIENCE.FR/TAGS/COVID-19



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 :
© Siemens - Inst. Max-Planck, Leipzig

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

À LA UNE

NEUROSCIENCES

P. 20

L'APPRENTISSAGE, UNE HISTOIRE DE NEURONES… ET DE MYÉLINE

R. Douglas Field

On pensait que la myéline, substance qui occupe une grande partie du cerveau, jouait surtout le rôle d'isolant électrique. En fait, cette membrane est une alliée indispensable des neurones pour l'apprentissage et la mémorisation.

P. 28

« POUR RETENIR, IL FAUT MYÉLINISER »

Entretien avec Bernard Zalc

La myéline qui entoure les fibres nerveuses interviendrait non seulement dans l'apprentissage, mais aussi dans la mémorisation à long terme. Tour d'horizon avec Bernard Zalc, qui enquête sur cette étonnante matière depuis plus de quarante ans.

RENDEZ-VOUS

P. 58
LOGIQUE & CALCUL
DESSINER UN ÉLÉPHANT AVEC UN SEUL PARAMÈTRE
Jean-Paul Delahaye

Reproduire n'importe quel jeu de données en nombre fini, par exemple des points qui esquissent la silhouette d'un animal : c'est ce que permet une fonction paramétrisée par un unique nombre réel.

P. 64
IDÉES DE PHYSIQUE
Les masques démasqués
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 68
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Comment les oiseaux chanteurs ont conquis le monde
Hervé Le Guyader

P. 72
SCIENCE & GASTRONOMIE
Goût de viande pour imitations de viande
Hervé This

P. 74
À LIRE ÉCOUTER

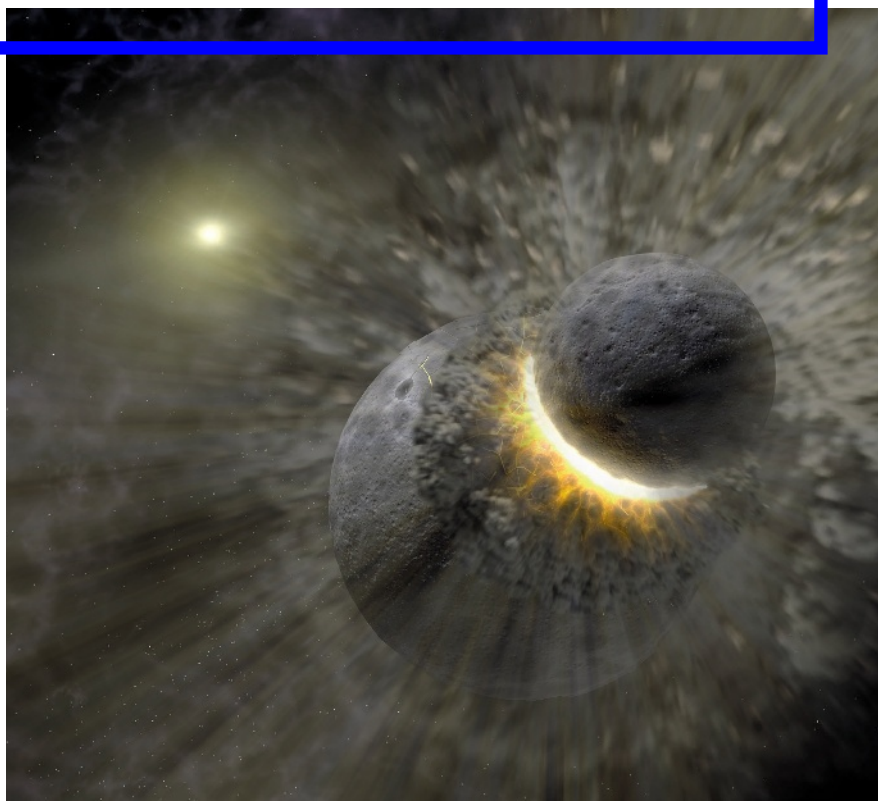
© NIAID-RML

ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.14 *Livres du mois*
P.16 *Homo sapiens informaticus*
P.18 *Questions de confiance*

PLANÉTOLOGIE

FORMATION DE LA LUNE : L'HYPOTHÈSE DE L'IMPACT RENFORCÉE



Une nouvelle analyse des roches lunaires montre que leurs données isotopiques sont compatibles avec une naissance de la Lune à la suite d'un impact entre la Terre et une protoplanète.

On pense que la Lune s'est formée par collision entre la Terre primordiale et une protoplanète. Une nouvelle analyse des roches lunaires appuie ce scénario.

La Lune est cruciale pour la vie sur Terre d'aujourd'hui : elle stabilise notamment la rotation de la planète et donc le cycle des saisons. Mais comment s'est-elle formée ? Au vu des connaissances actuelles, l'hypothèse la plus plausible est qu'un objet de la taille de Mars, nommé Théia, a percuté la Terre peu après la formation du Système solaire, il y a environ 4,5 milliards d'années.

Ce scénario de collision est appuyé par de nombreuses simulations numériques. Elles impliquent cependant que la Lune soit principalement constituée de matériau provenant de Théia. Or l'analyse des roches lunaires a montré une proximité troublante avec les roches terrestres. Comment expliquer cette similitude de composition ? Erick Cano et ses collègues, à l'université du Nouveau-Mexique, aux États-Unis, ont apporté une réponse en affinant l'étude des propriétés des roches provenant de différentes parties de la Lune.

Dès qu'il a été formulé, en 1974, le scénario de la naissance de la Lune, l'« hypothèse de l'impact géant » s'est rapidement imposé, parce qu'il rendait bien mieux compte des observations que les hypothèses concurrentes.

Mais même cette théorie a rapidement posé un problème majeur. Selon les simulations, entre 70 et 90 % de la masse de Théia aurait été éjectée lors de la collision et ferait partie de la Lune. La composition de cette dernière serait donc proche de celle de Théia. Mais, ces dernières décennies, les scientifiques qui ont étudié des roches lunaires rapportées par les missions *Apollo* et en particulier les rapports de concentration entre les isotopes de plusieurs éléments, ont constaté qu'en moyenne ces rapports isotopiques sont très similaires à ceux des roches terrestres. Comment l'expliquer ?

Soit Théia avait une composition semblable à celle de la Terre aujourd'hui,

© Nasa/JPL-Caltech

Théia et la Terre se seraient formées environ la même distance du Soleil dans le nuage de gaz originel, ce qui est très peu probable. Soit la matière de chacun des corps – tous deux une boule de roche en fusion à cette époque – s'est abondamment homogénéisée après l'impact, gommant les disparités de rapports isotopiques; problème: la grande proportion de la matière de Théia formant la Lune ne semble pas permettre une homogénéisation suffisante.

À moins qu'il y ait une troisième voie. Erick Cano et ses collègues ont réalisé de nouvelles analyses détaillées d'échantillons lunaires (des basaltes et des verres, par exemple), et ont remarqué que les rapports isotopiques de l'oxygène, loin d'être uniformes, varient sensiblement entre les différents types de roches lunaires! Mieux: les roches d'origine géologique profonde – remontées ensuite grâce aux mouvements mantelliques de la Lune primordiale – présentaient des données isotopiques éloignées de celles de la Terre, alors que les roches formées en surface sont très semblables aux roches terrestres.

D'après les chercheurs, la diversité des roches lunaires est donc cruciale. Ils proposent qu'après la collision entre Théia et la Terre, lorsque la matière éjectée a commencé à se condenser pour former la Lune, le satellite en devenir s'est retrouvé plongé dans une fine atmosphère formée de vapeurs de silicates provenant majoritairement de la Terre. Ces vapeurs auraient ensuite échangé de la matière avec les couches de roches supérieures, leur conférant des rapports isotopiques semblables aux données terrestres; les roches en profondeur elles, n'auraient pas été affectées.

D'ailleurs, Erick Cano et ses collègues ont aussi montré que la variabilité statistique des rapports isotopiques était trois fois plus importante pour les roches lunaires que pour les roches terrestres, ce qui semble confirmer un scénario de « contamination » postérieure des couches lunaires supérieures. C'est un coin de voile supplémentaire qui se lève sur l'histoire de notre fidèle compagnon céleste, qui recèle encore bien des énigmes. ■

LUCAS GIERCZAK

Nature Geoscience, rs 2020

MÉDECINE

Grippe et surinfection : une histoire de microbiote

Chaque année, la grippe touche entre 2 et 6 millions de personnes [illegible] surinfections bactériennes des poumons. Selon une équipe lilloise, des perturbations du microbiote intestinal favorisent de telles surinfections. Éclairage de son directeur, François Trottein.

Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

FRANÇOIS TROTTEIN
chercheur au CNRS, au centre d'infection et d'immunité de Lille (institut Pasteur de Lille)

Vous êtes spécialiste de l'immunité pulmonaire. Pourquoi vous êtes-vous intéressé au microbiote intestinal ?

Nous cherchions à comprendre comment le virus grippal favorise les surinfections bactériennes, qui conduisent à des décès. On sait que ce virus entraîne une immunosuppression dans le poumon. On sait aussi que le microbiote intestinal favorise à distance des mécanismes de défense dans le poumon, notamment contre les infections bactériennes, probablement en libérant diverses molécules telles que des métabolites. Nous nous sommes donc demandé si la grippe perturbait le microbiote intestinal et si cela avait un impact sur les mécanismes de défense dans le poumon et favorisait la surinfection.

Comment avez-vous procédé ?

Nous avons d'abord remarqué que l'infection grippale s'accompagnait d'une « dysbiose » – un changement dans la composition du microbiote intestinal. Ensuite, nous avons effectué des transferts de flore fécale : on traite des souris avec des antibiotiques pour détruire leur microbiote résiduel, puis on transfère dans leur intestin le microbiote de souris non grippées ou grippées. Un peu plus tard, on infecte ces souris avec *Streptococcus pneumoniae*, la principale bactérie responsable des surinfections pulmonaires. On a ainsi montré que le microbiote « dysbiotique » (celui des souris grippées) transférait une susceptibilité à l'infection.

Nous nous sommes alors concentrés sur les acides gras à chaînes courtes dont l'acétate, qui sont des métabolites majeurs du microbiote jouant un rôle clé dans la réponse immunitaire et inflammatoire. Nous avons eu la chance de voir qu'ils influaient sur la susceptibilité à la surinfection : les souris ayant une dysbiose produisaient moins d'acétate et étaient plus susceptibles d'être surinfectées. Il suffisait de leur faire boire de l'eau enrichie en acétate pour diminuer la propagation bactérienne dans les poumons.

Comment la grippe agit-elle sur le microbiote intestinal ?

Essentiellement via la perte d'appétit associée à l'infection. Les souris grippées perdent de 15 à 20 % de leur poids en quelques jours, ce qui est énorme. Or on sait depuis plusieurs années que l'alimentation influe sur la composition du microbiote. Nous avons montré que si l'on mime le comportement alimentaire d'une souris qui a la grippe, c'est-à-dire si l'on donne la même quantité de nourriture à des souris non infectées, ces souris perdent du poids, tout comme les souris grippées. De plus, ces souris sont bien plus sensibles à l'infection bactérienne. Et si l'on transfère leur microbiote à des souris receveuses, ces dernières sont aussi plus sensibles à l'infection. La perte d'appétit serait donc la cause principale de l'augmentation du risque d'infection bactérienne.

Ce phénomène n'est d'ailleurs probablement pas propre à la grippe. On pourrait le rencontrer dans d'autres pathologies virales sévères, comme les cas graves de Covid-19, voire dans des pathologies non infectieuses. Chez les grands brûlés, les personnes victimes d'un choc septique ou d'un accident vasculaire cérébral, une dysbiose se met en place et il arrive que ces patients décèdent d'une surinfection bactérienne. Nous examinons chez la souris si un mécanisme similaire est responsable de ce phénomène.

Avez-vous des pistes thérapeutiques ?

Nous avons identifié la cible de l'acétate dans les cellules, le récepteur FFAR2, et montré qu'une molécule spécifique de ce récepteur imite les effets de l'acétate. Il est cependant trop tôt pour lancer un essai clinique. D'autant que des perspectives de type prébiotique ou probiotique s'ouvrent aussi. Il s'agirait de préparer ou renforcer le microbiote avant l'hiver pour limiter le risque de développer des surinfections bactériennes. ■

V. Sencio *et al.*, *Cell Reports*, vol. 30, pp. 2934-2947, 2020

PALÉOANTHROPOLOGIE

NOUS SOMMES BIEN ISSUS DE NOMBREUX MÉTISSAGES

La simulation par ordinateur des métissages ayant conduit aux génomes d'*Homo sapiens* actuels suggère une très ancienne hybridation.

Il y a quelque 700000 ans, les bifaces apparaissent en Europe. Ces marqueurs de la culture matérielle acheuléenne signalent l'arrivée en Eurasie d'une vague africaine d'humains qui, s'y mêlant sans doute aux populations archaïques déjà présentes, sera à l'origine des Néandertaliens et de leurs cousins orientaux les Dénisoviens. Une vision que confirme l'équipe d'Alan Rogers, de l'université de l'Utah, aux États-Unis, après avoir testé quelle modélisation des hybridations successives entre populations ancestrales explique au mieux les génomes actuels.

Les chercheurs ont échafaudé huit modèles de métissages successifs plausibles. Ils envisagent d'abord une hybridation des «Superarchaïques» – les Eurasiens d'avant l'arrivée de la vague africaine d'il y a 700000 ans – avec ce qu'ils nomment les «Néandersoviens», les ancêtres communs aux Néandertaliens et aux Dénisoviens en Eurasie (les paléoanthropologues parleraient d'*Homo heidelbergensis* eurasiens). Ensuite, suivant les modèles, ils tiennent compte ou pas des métissages connus: le premier entre les Dénisoviens et une population inconnue, que les auteurs ont supposée être superarchaïque; le deuxième entre les ancêtres d'*H. sapiens* et ceux d'*H. neanderthalensis* il y a plus de 200000 ans, mais on ignore où); le troisième entre les Néandertaliens tardifs et les *H. sapiens* nouvellement arrivés en Eurasie il y a quelque 50000 ans.

Pour discriminer les modèles, ils ont utilisé une méthode statistique fondée sur un programme de comparaison des fréquences d'un jeu particulier de motifs ancestraux dans les génomes reconstitués d'un Africain yoruba, d'un Français, d'un Anglais, d'un Néandertalien européen, d'un Néandertalien sibérien et d'un Dénisovien avec celles que l'on mesure dans les génomes actuels. Le modèle le plus performant est celui qui reproduit les génomes contemporains avec la plus petite erreur statistique calculée.

Le modèle ayant gagné est celui qui joint au métissage entre Superarchaïques et Néandersoviens les trois autres déjà connus. Les chercheurs ont choisi un taux de mutation faisant consensus et un intervalle intergénérationnel intermédiaire entre celui des humains actuels et celui des chimpanzés, afin de dater par l'horloge génétique les divergences entre formes humaines.

Ils sont ainsi parvenus à la conclusion que la population superarchaïque s'est séparée de nos ancêtres africains anciens il y a 1,9 million d'années en s'installant en Eurasie (où les plus anciens fossiles retrouvés datent de 1,8 million d'années). Puis des Néandersoviens très peu nombreux sont à leur tour sortis d'Afrique il y a quelque 700000 ans (arrivée des bifaces en Europe) et se sont hybridés avec la population superarchaïque locale avant de se scinder en une lignée néandertalienne et une autre dénisovienne. La séparation aurait été effective il y a quelque 500000 ans et non vers 380000 ans comme on le pensait auparavant. Finalement, ces chercheurs placent le métissage tardif entre Néandertaliens et *H. sapiens* il y a 50000 ans. Un modèle qui reproduit bien la vision actuelle de l'évolution des Eurasiens, mais dont les performances – point à ne pas oublier! – dépendent crucialement des valeurs choisies pour ses paramètres. ■

Un crâne d'*Homo heidelbergensis*, c'est-à-dire de Néandersovien, en regard d'un crâne d'*Homo sapiens*.

500 000 ANS

LA SÉPARATION ENTRE NÉANDERTALIENS ET DÉNISOVIENS SE SERAIT PRODUITE IL Y A 500 000 ANS, ET NON IL Y A 380 000 ANS COMME ON LE PENSAIT AUPARAVANT.

FRANÇOIS SAVATIER

Science Advances, vol. 6(8), article eaay5483, 2020

© Procy/Shutterstock.com

EN BREF

UNE TAILLE BIEN DÉTERMINÉE

Les étoiles à neutrons sont des objets très denses et, à masse fixée, leur rayon est en fait assez bien déterminé. Mais à quel point ? Colin Capano, de l'institut Max-Planck de physique gravitationnelle, en Allemagne, et ses collègues ont montré, en exploitant les données provenant d'une fusion de deux de ces corps détectée en 2017, qu'une étoile à neutrons typique, de 1,4 masse solaire, a un rayon compris entre 10,4 et 11,9 kilomètres avec une probabilité de 90 %.

Nature Astronomy, 9 mars 2020

MINUSCULE DINOSAURE

Un dinosaure de la taille des plus petits colibris actuels ? C'est peut-être ce qu'ont découvert Lida Xing, de l'université chinoise de Géosciences, à Pékin, et ses collègues, grâce à un morceau d'ambre du Myanmar vieux de 99 millions d'années. Ce fragment contient un crâne complet long de 1,5 centimètre, appartenant à une nouvelle espèce à la classification encore incertaine, et exhibant des caractères typiques de la miniaturisation, comme des organes sensoriels proportionnellement grands.

Nature, 11 mars 2020

RÉCHAUFFEMENT ET INCENDIES

Les feux de brousse de l'été 2019-2020 en Australie ont battu de tristes records, avec près de 20 millions d'hectares de végétation brûlés. Quel rôle a le réchauffement climatique dans la survenue d'événements aussi extrêmes ? D'après l'étude menée par Geert Jan van Oldenborgh, de l'institut royal météorologique des Pays-Bas, le dérèglement climatique augmente actuellement d'au moins 30 % la probabilité de telles catastrophes – une valeur qui sera en hausse avec l'aggravation du réchauffement.

Nat. Hazards and Earth Syst. Sci., 11 mars 2020

© Joe Keel Shutterstock.com/mgvisionpanoramic; Hyeonjoong Kim et Ryan Hayward, université du Massachusetts à Amherst

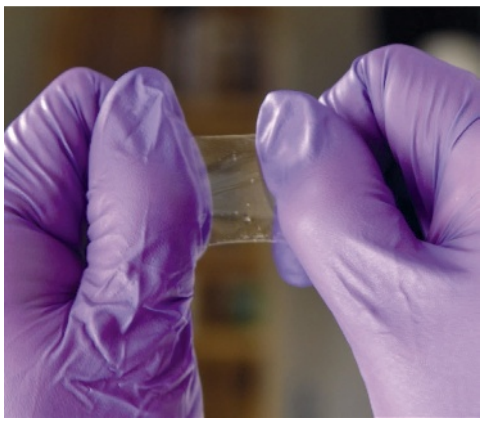
CHIMIE

DES TRANSISTORS SOUPLES

Cassants et rigides, les composants de l'électronique ne sont pas toujours adaptés à toutes les utilisations. Afin de contourner cette difficulté, des chercheurs explorent la piste de l'ionotronique, où des polymères remplacent les semi-conducteurs cristallins. Hyeong Jun Kim, de l'université du Massachusetts, aux États-Unis, et ses collègues ont mis au point des systèmes composés d'ionoélastomères.

L'électronique moderne est fondée sur le comportement des électrons au niveau de jonctions entre semi-conducteurs dopés : de surplus de charges positives (p) d'un côté de la jonction et négatives (n) de l'autre contraignent les électrons à circuler dans une direction unique. Ces jonctions p-n sont à la base des diodes et des transistors.

Est-il possible de concevoir des jonctions p-n avec d'autres matériaux que des semi-conducteurs cristallins ? Pour résoudre les problèmes des premiers dispositifs ionotroniques qui utilisaient des ions dans des hydrogels, l'équipe de Hyeong Jun Kim a synthétisé deux ionopolymères élastiques. L'un, polycationique, est chargé positivement grâce à des groupes imidazolium inclus dans sa structure ; il intègre aussi des ions négatifs



Les chercheurs ont créé des jonctions p-n avec des élastomères en vue de transistors flexibles et transparents.

mobiles. Il complète le semi-conducteur dopé p. L'autre, polyanionique, contient des groupes sulfonate chargés négativement et des ions positifs mobiles : il se substitue au semi-conducteur dopé n. Mis en contact, ces deux ionoélastomères se comportent comme une jonction p-n, où les porteurs de charges ions négatifs et positifs, remplacent les électrons des semi-conducteurs cristallins. Mais ils forment cette fois un dispositif transparent, souple et étirable. ■

H. J. Kim *et al.*, *Science*, vol. 367, pp. 773-776, 2020

PHYSIQUE

DES DUNES QUI SE REPOUSSENT

Dans les déserts de sable, le vent crée d'élégantes dunes et les déplace. Leur vitesse de migration varie : seule, plus une dune est volumineuse plus elle voyage lentement. Or les dunes sont rarement isolées ; les petites dunes devraient donc avancer plus rapidement que les grosses et des « collisions » devraient se produire, ce qui est très rarement observé. Pour résoudre cette énigme, Pascal Bacik, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont construit un dispositif simple : des tas de sable plongés dans un volume d'eau soumis à un courant constant – et mesuré la vitesse de déplacement de deux dunes identiques placées l'une derrière l'autre. Ils ont observé que la dune en aval du flux d'eau (et donc la première dans leur déplacement) avance plus vite que sa congénère, ce qui tend à limiter les

Isolée, une dune plus petite avance plus vite, mais des dunes proches subissent un couplage qui les écarte.

collisions entre dunes ! Les chercheurs ont montré que la dune en amont créait des tourbillons, lesquels migrent vers la dune en aval et accélèrent l'« érosion » et la migration de cette dernière. ■

L. G.

K. A. Bacik *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 124, article 054501, 2020

GÉNÉTIQUE

DES CHROMOSOMES CLANDESTINS CHEZ LES PLANTES À FLEURS

Pourquoi certaines plantes à fleurs ont-elles des chromosomes regroupés non par deux, mais par trois ou quatre, voire plus ? Des biologistes apportent une réponse.

Le fraisier des bois est diploïde : chaque cellule porte deux lots de ses chromosomes de base. Mais il existe aussi dans la nature des fraisiers avec jusqu'à dix lots de chromosomes. De fait, parmi les plantes à fleurs, nombreuses sont celles qui portent plus de deux lots : elles sont devenues « polyploïdes » au cours de l'évolution. La polyploïdie est cruciale d'un point de vue évolutif. Elle favorise en effet l'apparition de nouvelles espèces, en raison d'une barrière de fécondation entre individus n'ayant pas le même nombre de lots.

Bien qu'elle existe tant chez les plantes que chez les animaux, la fréquence des espèces polyploïdes chez les plantes à fleurs étonne les scientifiques, car divers mécanismes sont connus dans la nature pour empêcher leur polyploïdisation. Yanbo Mao, de l'université de Brême, en Allemagne, et ses collègues viennent d'expliquer comment certaines plantes à fleurs contournent l'un de ces processus de contrôle.

En général, chez les plantes qui se reproduisent de façon sexuée, deux plants diploïdes donnent un plant fils diploïde. Mais des anomalies surviennent parfois, soit pendant la production des gamètes, soit lorsque deux gamètes mâles fécondent simultanément un gamète femelle (polyspermie). Cela modifie le nombre de lots de chromosomes de la cellule œuf (ou « zygote »), et entraîne souvent la non-viabilité de l'embryon ou son infertilité. Dans le cas contraire, il en descend toute une lignée de plantes polyploïdes.

Mais chez les plantes à fleurs, la reproduction est plus complexe, car un même grain de pollen féconde plusieurs cellules femelles : l'une, le zygote, donnera l'embryon, et deux autres deviennent un tissu nourricier nommé « endosperme ». Or un mécanisme spécifique, le « blocage triploïde », empêche l'endosperme de se développer si le gamète mâle qui l'a formé portait un lot de chromosomes en trop. Comme les gamètes mâles du grain de pollen sont génétiquement identiques, ce blocage empêche donc le développement du zygote en un individu fils triploïde, et devrait limiter très fortement l'apparition de lignées polyploïdes. Pourquoi, alors, ces dernières restent-elles si nombreuses ?

Le fraisier du Chili, *Fragaria chiloensis*, est octoploïde : son patrimoine génétique comporte 8 lots de chromosomes homologues, pour un total de 56 chromosomes.

LES CHERCHEURS ONT, DANS UNE AUTRE EXPÉRIENCE, INTRODUIT CHEZ DES DONNEURS MÂLES UNE MUTATION NEUTRALISANT LE BLOCAGE TRIPLOÏDE ALORS QU'ILS ATTENDAIENT UNE PROPORTION DE DESCENDANTS TRIPLOÏDES MULTIPLIÉE PAR 15, LE RAPPORT N'A ÉTÉ QUE DE 2, SIGNE QUE LA POLYSPERMIE CONTOURNE LE BLOCAGE.

Peut-être grâce à la polyspermie. En 2017, une équipe allemande avait montré qu'il était possible d'obtenir des plants viables d'*Arabidopsis thaliana* (arabette des dames) polyploïdes à partir de parents diploïdes, par ce type de fertilisation. Yanbo Mao et ses collègues viennent d'expliquer comment.

À cette fin, ils ont observé, toujours chez *A. thaliana*, des situations où la polyspermie n'apporte des chromosomes en trop que dans le zygote, et non dans l'endosperme. Avec, à la clé, une descendance triploïde qui se développe toujours, puisque le blocage triploïde concerne seulement l'endosperme ! Pour ce faire, les chercheurs ont passé en revue 56 000 graines après pollinisation. Parmi elles, dix résultaient d'une double fécondation – la polyspermie est rare. Si tous ces embryons étaient polyploïdes – donc leur zygote originel l'était –, l'endosperme de la plupart ne l'était pas. Reste à savoir quel rôle ce mécanisme de contournement a joué dans l'apparition et l'évolution des plantes polyploïdes. ■

L. G.

Y. Mao *et al.*, *eLife*, vol. 9, article e52976, 2020

© Shutterstock.com/Kotchasi Charoensuk

ASTROPHYSIQUE

PLUIE DE FER SUR WASP-76B

Certaines exoplanètes présentent des phénomènes météorologiques très exotiques. C'est le cas de la planète WASP-76b, très proche de son étoile et en verrouillage gravitationnel avec celle-ci. En présentant toujours la même face à l'étoile, la température y monte jusqu'à 2400 °C. Grâce au spectrographe Espresso du *VLT* (*Very Large Telescope*) au Chili, David Ehrenreich, de l'université de Genève, et ses collègues ont montré que le fer est vaporisé sur la face éclairée. Puis des vents violents transportent le métal gazeux vers la face à l'ombre, où la température n'atteint que 1500 °C. Le métal se condense alors rapidement en gouttelettes... Résultat: il pleut du fer sur ce monde aux conditions extrêmes. ■

SEAN BAILLY

D. Ehrenreich *et al.*, *Nature*, en ligne le 11 mars 2020

ÉTHOLOGIE

DES PERROQUETS PROBABILISTES

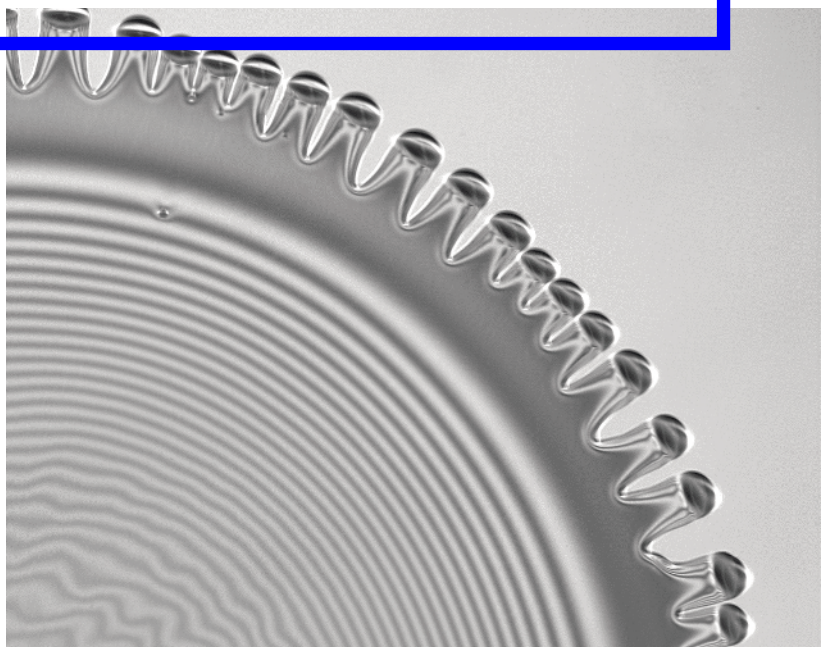
Dans la vie courante, il nous faut souvent prendre une décision en estimant la probabilité de tel ou tel événement. Une capacité qui n'était prouvée jusque-là que chez les grands singes. Mais Amalia Bastos et Alex Taylor, de l'université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande, ont découvert que les perroquets en sont aussi dotés. Dans leur étude, une expérimentatrice apprenait à chaque oiseau qu'une petite barre noire lui vaudrait une récompense alimentaire, puis plongeait chacune de ses mains dans une boîte transparente contenant des barres noires et orange en proportions différentes, et en ressortait une barre tenue dans son poing fermé devant l'animal. Celui-ci indiquait ensuite du bec le poing que l'expérimentatrice devait ouvrir. Le perroquet a presque toujours choisi la main ayant pioché dans la boîte comptant la plus grande proportion de barres noires, signe qu'il considérait avoir plus de chances d'en obtenir une noire! ■

GUILLAUME JACQUEMONT

A. P. M. Bastos *et al.*, *Nature Communications*, vol. 11, article 3165, 2020

PHYSIQUE

DES DOIGTS CRÉÉS PAR UNE GOUTTE



On dépose une goutte d'un mélange de deux liquides sur une plaque. Si ces liquides ont des tensions de surface très différentes, des « doigts » se forment ; sinon, ce sont des gouttelettes.

On sait que le comportement du filet d'eau coulant d'un robinet n'est pas toujours le même. Quand la colonne d'eau dépasse une certaine longueur – qui dépend du débit –, elle se décompose en gouttelettes. Derrière cette observation se cachent plusieurs aspects de la mécanique des fluides, comme l'effet de la tension superficielle, une force due aux interactions microscopiques entre les molécules et qui influe sur la forme des interfaces entre deux milieux fluides (gazeux ou liquides). Parfois, la tension superficielle conduit à des effets plus surprenants: Asher Mouat et ses collègues, de l'université Emory, aux États-Unis, ont étudié les excroissances qui naissent sur le bord de gouttes formées d'un mélange de deux liquides aux propriétés physiques différentes.

Les chercheurs ont réalisé plusieurs mélanges, contenant chacun une espèce majoritaire (le solvant) et une espèce présente en très petite quantité (le soluté). Ils ont déposé une goutte de chaque mélange sur une surface de silicium très lisse. À mesure que la goutte s'étale puis s'évapore, soit des « doigts » de liquide s'étendent vers l'extérieur sur tout le pourtour de la goutte, soit de simples gouttelettes se forment.

Comment expliquer cette différence? D'après Asher Mouat et ses collègues, cela serait lié à la tension superficielle. On peut associer à chaque liquide une tension de surface avec l'air. Les physiciens ont remarqué que, lorsque le solvant et le soluté ont des tensions de surface proches, des gouttelettes se forment, alors qu'une différence importante entre les deux donne lieu à des « doigts ». Ce qu'ils ont ensuite retrouvé par la théorie: un mécanisme d'instabilité similaire à celui du filet d'eau du robinet est à l'œuvre. ■

L. G.

A. P. Mouat *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 124, article 064502, 2020

A. P. Mouat et al., Physical Review Letters, vol. 124, n° 6, article 064502, 2020

PHYSIQUE THÉORIQUE

UNE CONSTANTE À L'ÉPREUVE DES TROUS NOIRS

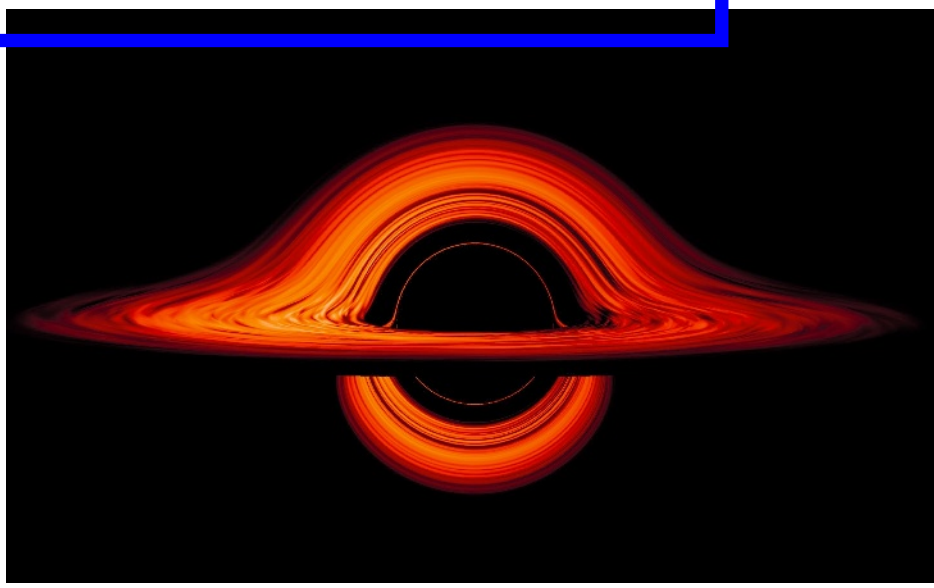
Selon certaines théories physiques, la « constante de structure fine », associée à l'interaction électromagnétique, serait en fait une grandeur variable. Mais de nouvelles mesures semblent infirmer cette idée.

En physique, le choix de certains mots est parfois déroutant. Une grandeur constante devrait être immuable, non ? Mais parfois, les chercheurs imaginent qu'une constante ne l'est pas vraiment ! C'est le cas en physique des particules. Le modèle standard fait notamment intervenir la « constante de structure fine », un nombre sans dimension qui caractérise l'intensité de l'interaction électromagnétique (par exemple entre électrons et photons). Dans le cadre de certaines théories, comme la théorie des cordes, qui tentent de concilier la relativité générale et la physique quantique – des théories restées à ce jour incompatibles –, la constante de structure fine pourrait varier. Cependant, Aurélien Hees, de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont utilisé des observations d'étoiles proches d'un trou noir supermassif pour montrer que même dans ces conditions physiques extrêmes, il n'y a pas de variation détectable de la constante de structure fine.

L'idée que ce nombre lié à l'électrodynamique quantique (la formulation quantique de l'électromagnétisme), noté α et égal à environ 1/137, ou $7{,}297\times10^{-3}$, soit en fait variable n'est pas nouvelle : il pourrait bien l'être, mais en présentant des variations trop faibles pour qu'elles soient détectables avec les mesures actuelles. Pour tenter de mettre en évidence de telles variations, des astrophysiciens réalisent depuis plusieurs décennies des mesures de phénomènes physiques qui font intervenir ce nombre, comme en spectroscopie stellaire.

Certaines longueurs d'onde très précises, absorbées par l'atmosphère d'une étoile, sont absentes ou moins intenses dans la lumière reçue : ce sont les « raies d'absorption ». Or les longueurs d'onde des raies d'absorption font intervenir de façon cruciale la constante de structure fine. Si α varie, ces longueurs d'onde sont modifiées. Pour l'instant, aucune mesure n'a indiqué de façon probante de tels changements, ni dans le temps (en examinant des étoiles très lointaines, donc dans l'Univers jeune) ni en fonction de l'environnement de l'étoile.

Aurélien Hees et ses collègues ont cette fois cherché des variations dans un contexte inédit :



Les astrophysiciens cherchent des variations éventuelles de la constante de structure fine dans des conditions physiques extrêmes, comme au voisinage des trous noirs supermassifs *(ici, une vue d'artiste)*.

10^5

LES CINQ ÉTOILES ÉTUDIÉES SONT VIEILLES ET FROIDES : LEUR ATMOSPHÈRE, CONTENANT DE L'OXYGÈNE ET DU CARBONE, LEUR CONFÈRE DES RAIES D'ABSORPTION TRÈS NETTES ET NOMBREUSES. DE PLUS, LEURS LONGUEURS D'ONDE DÉPENDENT FORTEMENT DE α JUSQU'À 10^5 FOIS PLUS QUE POUR LES ÉTOILES JEUNES

…ssif, Sagittarius A*, situé au centre de la Voie lactée. Les chercheurs ont exploité des mesures de spectroscopie réalisées entre 1995 et 2018 sur cinq étoiles proches du centre de la galaxie, et mesuré les longueurs d'onde de leurs raies d'absorption, en cherchant un décalage par rapport aux valeurs habituelles, mesurées dans un environnement contrôlé sur Terre.

Leur résultat confirme les études précédentes : ils n'ont détecté aucune variation significative de la constante de structure fine. L'équipe a aussi obtenu une borne sur la variation potentielle de α entre sa valeur au voisinage immédiat des étoiles en question et sa valeur habituelle. La variation relative de α (c'est-à-dire la variation rapportée à sa valeur connue) ne peut pas dépasser $6{,}8\times10^{-6}$. Une limite similaire à d'autres bornes obtenues précédemment pour des quasars. Les théories actuelles tiennent bon ! ■

L. G.

A. Hees *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 124(8), article 081101, 2020

© Nasa's Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman

BIOLOGIE ANIMALE

UNE CIBLE INTESTINALE

La régulation des nutriments dans l'organisme est assurée par des circuits parfois complexes. Dans une sous-population de cellules de l'intestin de la drosophile, Shamik Redhai, de l'Imperial College, à Londres, et ses collègues ont mis en évidence une protéine, Hodor, sensible aux ions zinc. Quand elle se lie à ces ions, elle ouvre un canal pour des ions chlore, ce qui facilite non seulement la détection de nutriments, mais aussi le développement de la larve : quand elle est altérée, la drosophile accuse un retard de croissance. Le gène codant *Hodor* étant propre aux insectes, l'équipe de chercheurs propose de l'altérer chez des moustiques tels qu'*Anopheles gambiae* afin de neutraliser les populations de ces insectes vecteurs de maladies. ■

S. B.

S. Redhai *et al.*, *Nature*, en ligne le 18 mars 2020

PHYSIQUE DES PARTICULES

LE NEUTRON UN PEU PLUS À NU

Parce qu'il est constitué de quarks électriquement chargés, le neutron peut être globalement neutre, mais présenter une distribution de charge dotée d'un axe privilégié, ce qui donnerait lieu à un « moment dipolaire électrique » non nul. Grâce à une nouvelle expérience, Guillaume Pignol, du Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie à Grenoble, et ses collègues ont réduit de moitié la limite supérieure sur cette grandeur. Pourquoi est-ce important ? Le modèle standard de la physique des particules ne serait qu'une approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale qui reste à découvrir. Or cette théorie pourrait contenir un mécanisme qui produit un moment dipolaire électrique non nul. La mesure de celui-ci donne donc un indice sur cette théorie. Mais, surtout, le mécanisme en jeu expliquerait aussi pourquoi l'Univers contient de la matière, plutôt que de l'antimatière… ou rien ! ■

S. B.

C. Abel *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 124, article 081803, 2020

MATHÉMATIQUES

PRIX ABEL 2020 : HILLEL FURSTENBERG ET GREGORI MARGULIS

Hillel Furstenberg *(à gauche)* et Gregori Margulis *(à droite)*, récompensés pour leurs travaux en théorie ergodique et pour l'application de techniques ergodiques à d'autres domaines.

Contrairement à la médaille Fields, le prix Abel n'est pas réservé aux mathématiciens de moins de quarante ans, mais vise à honorer toute la carrière des lauréats. Cette année, l'Académie norvégienne des sciences et des lettres a décerné cette distinction à l'Israélo-Américain Hillel Furstenberg, qui a enseigné à l'université hébraïque de Jérusalem, et au Russo-Américain Gregori Margulis, qui occupe une chaire de recherche à l'université Yale, pour leurs travaux liés à la théorie ergodique, une branche des probabilités.

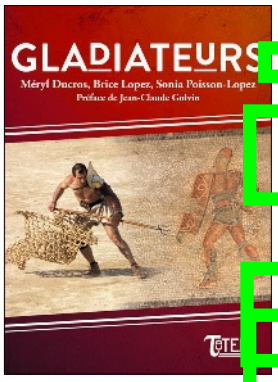
La théorie ergodique puise ses sources dans la physique statistique. Elle s'intéresse à un type de système dans lequel, pour estimer la valeur moyenne d'une grandeur sur tous les éléments de ce système, on peut calculer la moyenne temporelle de cette grandeur pour un élément fixé de ce système ; c'est le cas, par exemple, pour les molécules d'un gaz et leur vitesse moyenne. Les deux mathématiciens ont développé de nouvelles méthodes en théorie ergodique et, surtout, jeté des ponts entre ce domaine et d'autres champs des mathématiques, comme la géométrie, la combinatoire, la théorie des groupes ou la théorie des nombres.

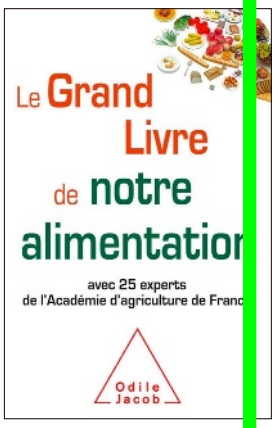
Par exemple, en théorie des groupes (des structures algébriques munies d'une opération inversible, comme l'ensemble des nombres entiers et l'opération d'addition), Hillen Furstenberg a étudié d'un point de vue ergodique les chemins parcourus dans un groupe en effectuant des opérations entre des éléments pris au hasard ; on parle de « marches aléatoires » sur les groupes. En combinatoire, Gregori Margulis a, lui, adapté des notions ergodiques pour exhiber des familles de graphes dits « expanseurs », c'est-à-dire dont les sous-ensembles de sommets sont très connectés, très importants en informatique théorique. ■

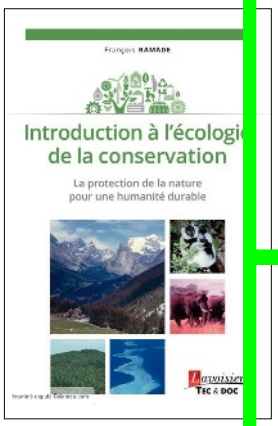
L. G.

Site du prix Abel : https://www.abelprize.no/

© Jan Bezerti







ARCHÉOLOGIE

GLADIATEURS

Méryl Ducros, Brice Lopez et Sonia Poisson-Lopez

Tautem, 2019
216 pages, 29 euros

Depuis les livres de Louis Robert et de Georges Ville, les historiens croyaient tout savoir sur la gladiature. C'était compter sans une importante innovation due aux «reconstituteurs» : des curieux qui refont l'équipement complet de personnages anciens et qui essaient de retrouver leur gestuelle.

Le lecteur trouvera en première partie de ce livre une présentation des acteurs de ce genre de spectacle. Les gladiateurs se produisaient dans des amphithéâtres (et pas dans des cirques réservés aux courses de chevaux) ; ils étaient surveillés par un arbitre et tous les frais étaient assurés par un éditeur. Deux inscriptions font connaître des «lois», qui permettent aussi de connaître les prix maximaux pratiqués.
Ces combattants étaient des volontaires, des hommes libres (mais le plus célèbre d'entre eux, Spartacus, était un esclave), parfois des femmes. Le but du jeu était d'opposer des armements différents : fantassin lourd contre fantassin léger, etc., dans une corrida où le taureau était remplacé par un homme.

Dans une deuxième partie du livre les auteurs apportent leur contribution au débat, dans un exposé qui relève des sciences humaines et expérimentales à la fois. Ils confrontent les textes et l'iconographie (stèles, lampes…) à leurs expériences d'escrimeurs. Ils décrivent les positions initiales, la garde (la jambe gauche en avant) et la garde inverse (cette fois, c'est la jambe droite qui est en avant). Ensuite, les combattants pratiquaient une escrime particulière, en fonction de leur armement ; on distingue cinq grands duels, qui mettent en jeu surtout le thrace (petit bouclier et glaive courbe), le mirmillon (grand bouclier et épée courte) et le rétiaire (filet et trident). Ainsi, tout est dit dans ce livre, avec même du neuf.

YANN LE BOHEC
PROFESSEUR ÉMÉRITE À L'UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE

NUTRITION

LE GRAND LIVRE DE NOTRE ALIMENTATION

Académie d'agriculture

Odile Jacob, 2019
408 pages, 23,90 euros

À travers une centaine de questions-réponses couvrant l'ensemble des aspects alimentaires et nutritionnels, 25 experts, membres de l'Académie française d'agriculture, tentent de répondre à de multiples interrogations sur notre alimentation.

Que vais-je faire à manger aujourd'hui ? Réfléchir au menu, faire les courses, cuisiner, partager ce repas, et pour certains, prendre ses repas en restauration collective : gestes quotidiens et familiers s'il en est. Et pourtant… Insidieusement, le doute et une certaine culpabilité s'installent. Est-ce que je mange bien ? Les aliments que j'achète sont-ils sains ? Comment sont-ils produits ? Dois-je manger «allégé» ou sans gluten ? La viande, les œufs, le lait : sont-ils vraiment des bombes à retardement ? Bio ou pas bio ? Et mon cholestérol dans tout ça ? Les graisses, bonnes ou mauvaises pour la santé ? Les circuits courts sont-ils meilleurs et écologiquement plus performants ? Qui est responsable de la sécurité alimentaire et comment celle-ci s'exerce-t-elle ? Gaspillage alimentaire, faim dans le monde et bientôt 10 milliards d'êtres humains à nourrir : c'est quoi l'alimentation durable ?

Les réponses à ces questions nous apportent un faisceau de recommandations utiles afin de nous réconcilier avec l'acte le plus banal et le plus fondamental de la vie quotidienne : manger sain et partager ce plaisir en préservant nos grands équilibres physiologiques et, ainsi, notre santé.

BERNARD SCHMITT
CERN LORIENT

ÉCOLOGIE

INTRODUCTION À L'ÉCOLOGIE DE LA CONSERVATION

François Ramade
Lavoisier, 2020
697 pages, 169 euros

Cette encyclopédie d'écologie de la conservation est illustrée toutes les deux pages par une figure illustrée en couleur, réduite et remaniée pour économiser de la place et pour la rendre plus claire. C'est dire sa densité, appropriée pour traiter ce qui constitue indéniablement un sujet majeur de notre époque. Les exemples concrets du monde entier défilent à raison de plusieurs par page, avec 700 références bibliographiques.

Du reste, un humour involontaire s'exprime dans le titre, qui voudrait faire de cette somme une simple *Introduction à l'écologie de la conservation* alors qu'il s'agit d'un ouvrage solide et bienvenu pour dissiper la confusion constante entre écologie scientifique et politique, la première ayant engendré la seconde un siècle plus tard… Aujourd'hui, les deux tendent à se confondre, mais il est indispensable à l'homme cultivé de savoir les distinguer pour éviter les discussions de café du commerce.

L'auteur, professeur honoraire d'écologie à la faculté des sciences d'Orsay, a écrit 27 livres académiques traduits dans plusieurs langues. Il ne s'est pas contenté d'être un enseignant-chercheur remarquable, puisqu'il a passé sa vie à militer pour la défense de la nature et des animaux, en particulier en tant que président de la Société nationale de la protection de la nature. Il peut se permettre de faire suivre la partie théorique d'une partie pratique et administrative. Réputé pour son franc-parler, il traite ici de sujets tabous comme la démographie (que Al Gore a préféré éviter dans son film *Une vérité qui dérange*) ou la chasse en France… De niveau bac, ce livre est destiné à tous les lecteurs avides de comprendre en profondeur notre époque troublée et en particulier aux étudiants en biologie ou en sciences de l'environnement. Un seul regret : son prix élevé qui nuira à sa diffusion.

PIERRE JOUVENTIN
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

PALÉONTOLOGIE

LE GRAND ATLAS DES DINOSAURES

Mark Norell
Glénat, 2019
240 pages, 39,95 euros

Ce beau livre s'ajoute à la longue liste des ouvrages consacrés aux dinosaures, richement illustrés et destinés à un large public. Mais plutôt que proposer une fois de plus un catalogue aussi complet que possible de ces animaux, l'auteur, paléontologue américain renommé, a choisi une quarantaine d'espèces représentatives, à partir de fossiles pour la plupart conservés dans les très riches collections du Muséum américain d'histoire naturelle de New York.

Que les amateurs des grands classiques de la paléontologie tels que *Tyrannosaurus rex* ou *Diplodocus longus* se rassurent, leurs dinosaures préférés sont au rendez-vous – mais en compagnie de congénères moins connus, tels que *Citipati osmolskae* ou *Mononykus olecranus* (tous deux découverts dans le Crétacé de Mongolie où l'auteur a beaucoup travaillé). Et les lecteurs un peu avertis des progrès récents de la paléontologie ne s'étonneront pas de voir figurer quelques oiseaux dans cet atlas des dinosaures.

Le livre ne se résume d'ailleurs pas à une énumération d'espèces, puisqu'il aborde diverses grandes questions telles que celles de la biologie et de la classification des dinosaures, ou encore de leur extinction. La qualité et l'abondance de l'illustration frappent. Comme il sied à un tel ouvrage, on y trouve de nombreuses reconstitutions montrant les dinosaures tels que la science moderne les imagine (à l'occasion couverts de plumes), mais ce ne sont peut-être pas là les images les plus remarquables. On pourra leur préférer les photos de fossiles spectaculaires par leur exceptionnelle conservation, ou encore les documents anciens qui nous replongent dans l'âge héroïque de la paléontologie, quand c'était encore une aventure que d'aller chercher des squelettes de dinosaures dans les contrées reculées de l'Ouest américain ou du désert de Gobi.

ERIC BUFFETAUT
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE DE L'ENS - CNRS, PARIS

ET AUSSI

LETTRES À MARIE CURIE
Jean-Marc Lévy-Leblond (dir.)
Thierry Marchaisse, 2020
210 pages, 17,50 euros

Ces lettres factices à Marie Curie sont anachroniques. Elles valent par la curiosité que suscite ce que leurs auteurs ont à dire à la grande Irène. Ainsi, Jean-Philippe Uzan lui parle du saturnium, un élément stable à… 2 092 ou 1 810 nucléons ! Marjane Satrapi, autrice du film *Radioactive*, exprime à quel point, pour elle, Marie Curie est un exemple à suivre. Interprétée par la philosophe Emmanuelle Huisman-Perrin, Lise Meitner, grande physicienne allemande, codécouvreuse de la fission nucléaire et injustement privée du prix Nobel correspondant, discute avec Marie Curie de la façon, dont toutes les deux, pionnières en science, ont essuyé les plâtres pour les autres femmes…

CLIMAT, PARLONS VRAI
Jean Jouzel et Baptiste Denis
François Bourin, 2020
216 pages, 16 euros

Voici un dialogue intergénérationnel entre le climatologue Jean Jouzel et Baptiste Denis, un jeune journaliste curieux. À partir de questions réponses, ils analysent ensemble le phénomène du réchauffement climatique et ses perceptions dans la grande société mondiale que nous partageons désormais. Les questions sont pertinentes et les réponses très intéressantes à lire, tant le grand climatologue a le don de la clarté. Tous ceux que passionne la question apprécieront de lire ce dialogue.

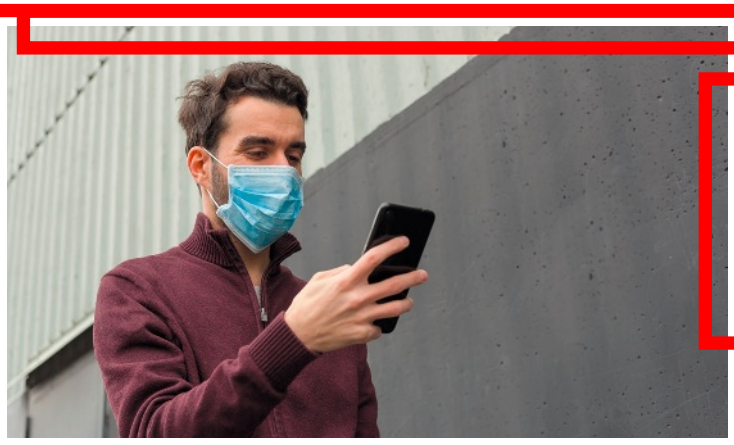
C. Q. F. D.
Yan Pradeau
Flammarion, 2020
384 pages, 23,90 euros

Quelle bonne idée que ce livre, qui montre les nombreuses façons de prouver en mathématiques. Il existe par exemple plus de 300 preuves du théorème de Pythagore. Pour introduire chacun des types de preuve, l'auteur invente des anecdotes de la vie de Maîtresse Mô, une (vraie) mathématicienne chinoise du XVIIe siècle. Des éléments d'histoire des mathématiques accompagnent les discussions de cas. La variété de la pensée mathématique apparaît dans ce livre, que l'on peut déguster agréablement par petites touches.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

COVID-19 : UNE SURVEILLANCE DES MALADES EFFICACE ?

L'idée de suivre les malades du Covid-19 grâce à leur téléphone est probablement vouée à l'échec. Surtout si sa mise en œuvre se fait au prix de la restriction des libertés.



Une idée avancée pour contrer la pandémie de Covid-19 est de surveiller chaque malade grâce à son téléphone portable.

Pour sortir la population mondiale du confinement tout en limitant la propagation du virus SARS-CoV-2 responsable du Covid-19, une solution mise en place dans plusieurs pays consiste à interdire aux malades de se déplacer. Et, chacun ayant un téléphone dans sa poche, en contact permanent avec une borne d'un réseau téléphonique, il suffit de demander aux opérateurs de ces réseaux de signaler à la police et à la justice les malades qui contreviendraient à cette interdiction et les personnes qu'ils auraient croisées.

Bien entendu, utiliser un téléphone, qui n'a pas été conçu dans ce but, pour surveiller des malades est en contradiction avec certaines de nos valeurs, notamment le respect de la vie privée.

Cette question de la surveillance des malades nous apparaît donc comme un dilemme, qui oppose l'impératif de la préservation de la santé publique et celui de la préservation des libertés fondamentales. On peut même la voir comme un dilemme qui oppose deux conceptions de l'interrogation éthique : le conséquentialisme, selon lequel nous devons évaluer nos actions en fonction de leurs conséquences uniquement – la fin justifiant, en quelque sorte, les moyens –, et l'éthique des vertus, selon laquelle nous devons les évaluer en fonction des valeurs qu'elles expriment – quelles que soient leurs conséquences.

Il y a une énorme différence entre «être surveillé» et «se surveiller».

En fait, même si nous nous en tenons à une éthique purement conséquentialiste, il n'est pas évident que la surveillance des malades soit une action bonne, c'est-à-dire efficace. Il est en effet facile, pour se soustraire à cette surveillance, de sortir en laissant son téléphone chez soi, d'avoir deux téléphones, de ne pas en avoir du tout, ou de simplement déclarer ne pas en avoir. Bien entendu, une parade a déjà été trouvée : mettre un bracelet électronique à toutes les personnes malades qui déclarent ne pas avoir de téléphone. Mais y aura-t-il assez de bracelets électroniques pour tout le monde ?

Comme cette épidémie n'est pas la première de l'histoire, nous avons déjà expérimenté des mesures coercitives et nous disposons d'évaluations empiriques qui montrent leur inefficacité. Par exemple, les pays qui criminalisent l'usage de drogues ont un taux de contamination des toxicomanes au VIH bien supérieur à ceux qui disposent de « salles de shoot » ou de dispositifs d'échange de seringues. De la même façon, le suivi à la trace du téléphone des malades du Covid-19 en éloignera certains des systèmes de soins.

Une alternative à la surveillance est d'inciter les malades à se surveiller eux-mêmes, par exemple en se déclarant malades grâce à une application sur leur téléphone, ce qui permettrait de connaître très précisément l'évolution de l'épidémie. Il y a en effet une énorme différence entre « être surveillé » et « se surveiller ». Une politique de santé publique ainsi fondée sur la confiance, et non la coercition, semble être ce qui a permis à Taïwan d'avoir un taux de contamination au SARS-CoV-2 plus faible que beaucoup d'autres pays.

Alors que l'épidémie de Covid-19 a suscité un énorme élan de solidarité et de responsabilité, il serait dommage que nous ne comprenions pas l'efficacité des mesures sanitaires fondées sur ces valeurs et continuions à préférer restreindre, de manière temporaire, les libertés fondamentales.

Temporaire ? C'est aussi ce qu'était le plan Vigipirate, déclenché en janvier 1991, pour faire face à une situation exceptionnelle, la première guerre du Golfe, et qui a pris fin en avril 1991. Avant d'être réactivé, pour d'autres raisons, en 1995, puis indéfiniment prolongé, et finalement intégré dans le droit commun. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria, enseignant à l'École normale supérieure [illegible] national pilote d'éthique du numérique.

© Moha El-Jaw/Shutterstock.com

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

PAG20STD

☑ **Oui, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

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

59 € Au lieu de ~~82,80 €~~

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

79 € Au lieu de ~~114,40 €~~

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

99 € Au lieu de ~~174,40 €~~

* Prix de vente en kiosque. Offre réservée aux nouveaux abonnés. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @ .....

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

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

☐ **Carte bancaire**

N° ☐☐☐☐ ☐☐☐☐ ☐☐☐☐ ☐☐☐☐

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

Signature obligatoire :

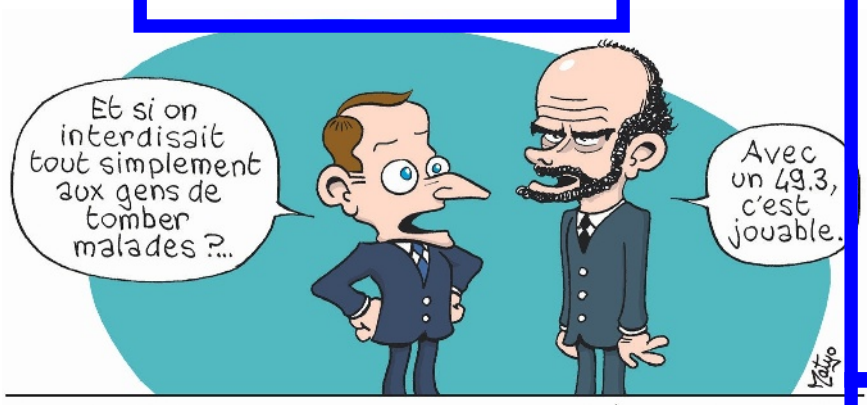
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters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

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

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

DE LA MESURE EN TOUTE CRISE… SANITAIRE !

La Société royale de médecine, créée en 1778, inaugurait l'action de l'État en matière de santé publique. Quelle leçon en tirer aujourd'hui ?



La gestion de la santé des populations a-t-elle toujours été une affaire d'État ? À l'heure du Covid-19, l'intervention publique sur les épidémies est un réflexe dans la plupart des pays. En France, le conseil scientifique mis en place le 11 mars par le ministre de la Santé, Olivier Véran, est emblématique de l'intégration des spécialistes des maladies infectieuses dans la gestion gouvernementale de la crise. Cette construction administrative, qui tire sa légitimité de la neutralité des expertises médicales, nous est familière. Pour autant, le domaine d'intervention de l'État, qualifié de « santé publique », dans lequel se déploient les savoirs épidémiologiques, a une histoire.

Jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, c'étaient les œuvres de charité et de bienfaisance qui assumaient les préoccupations politiques liées au bien-être corporel. Placer la santé de la population sous la responsabilité de l'État n'était alors qu'une revendication portée par quelques médecins tels que l'Allemand Johann Peter Frank, qui a popularisé le concept de police médicale.

Il fallut attendre les premières descriptions médicales des épidémies, et surtout les tentatives de systématisation de ces observations, pour qu'une expertise médicale articulée à l'action publique débouche sur une administration. Ainsi est née en 1778 la Société royale de médecine, institution originale qui a disparu à la Révolution. Son ambition était de conduire des « topographies médicales » visant à établir des liens entre le climat et la survenue des épidémies. Ce n'était pas nouveau. Les changements météorologiques étaient couramment répertoriés par des chroniqueurs afin de détecter les signes des grandes pestes.

> **La standardisation du recueil de données a renforcé la coordination verticale**

L'innovation portait sur la manière de recueillir les données. Elle fera de cette société la première agence d'État dédiée à la santé. Marqué par un lien étroit entre des médecins locaux et des structures administratives déconcentrées, son pouvoir était directement lié à la géographie du royaume. Les topographies opéraient sur la base d'enquêtes systématiques s'appuyant sur un recueil uniformisé des données climatiques dans toutes les provinces. Un seul fabricant officiel était désigné pour livrer les thermomètres et les baromètres utilisables par les sociétaires. Le succès de l'opération découlait de la standardisation réussie de cette collecte, et en particulier de l'étalonnage de ces instruments. La fiabilité des mesures prises dans différentes localisations reposait sur un protocole de recueil très strict, effectué à la même heure. Les données compilées dans des tables formatées permettaient leur comparaison.

Si aucune corrélation véritable n'a été établie entre le climat et les épidémies, cette rigueur a abouti aux premières données épidémiologiques fiables mobilisables par les pouvoirs publics.

Quelles leçons retenir de cette histoire matérielle de la mesure ? Tout d'abord, sa nature est politique. La standardisation du recueil de données a renforcé la coordination verticale, de la haute administration royale aux médecins locaux. Ensuite, les médecins sont devenus les porte-parole officiels de la gestion publique de l'épidémie. Enfin, au regard de la pandémie actuelle, on peut déduire que la comparabilité internationale des données de mortalité et la standardisation des logiques de dépistage à grande échelle renforceraient la légitimité des autorités sanitaires au niveau mondial.

« L'histoire est une galerie de tableaux où il y a peu d'originaux et beaucoup de copies », rappelait le philosophe Alexis de Tocqueville. Si bien qu'une capitalisation centralisée de données obtenues de la même manière fournirait des indicateurs fiables propices à une réactivité concertée. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation,

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET

15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE

Crédit photo : © Christophe Abramowitz

france inter

INTERVENEZ

ABONNEZ-VOUS AU PODCAST DE L'ÉMISSION

L'ESSENTIEL

> Seuls, les points de connexion entre neurones – les synapses – enregistrent que les souvenirs des réflexes les plus élémentaires.

> En effet, l'apprentissage et la mémoire de tâches plus complexes nécessitent le couplage d'informations provenant de nombreuses régions cérébrales différentes.

> Cette activité modifie la structure de la myéline, le matériau isolant qui entoure les câbles neuronaux.

> Ce matériau et sa plasticité se révèlent jouer un rôle dans l'apprentissage en ajustant la vitesse de transmission de l'information par les réseaux neuronaux.

L'AUTEUR

R. DOUGLAS FIELDS
directeur de recherche au sein du département Développement et plasticité du système nerveux des Instituts américains de la santé, à Bethesda

L'apprentissage, une histoire de neurones... et de myéline

On pensait que la myéline, cette substance blanche qui occupe une grande partie du cerveau, jouait surtout le rôle d'isolant électrique. En fait, cette membrane est une alliée indispensable des neurones pour l'apprentissage et la mémorisation.

Comment le kilo et demi de chair flasque entre nos oreilles apprend-il? Nos idées sur cette question remontent aux expériences d'Ivan Pavlov montrant que les chiens apprennent à saliver au son d'une clochette. En 1949, le psychologue canadien Donald Hebb a adapté la «règle de l'apprentissage par association» de Pavlov pour expliquer comment les cellules du cerveau acquièrent des connaissances. Hebb a proposé que lorsque deux neurones sont excités ensemble, envoyant simultanément des impulsions électriques, les connexions entre eux – les synapses – se renforcent. Quand cela se produit, l'apprentissage a lieu. Dans le cas des chiens, cela signifierait que le cerveau sait dorénavant que le son d'une cloche est immédiatement suivi de nourriture. Une théorie souvent résumée par la formule: «Des neurones excités ensemble se lient entre eux.»

La théorie s'est révélée solide, et les neuroscientifiques ont décrit en détail les mécanismes moléculaires qui gouvernent les changements des synapses durant un apprentissage. Mais tout ce dont nous nous souvenons ne résulte pas d'une récompense ou d'une punition. En fait, la plupart des expériences sont oubliées. Il arrive que des neurones excités ensemble ne se lient pas entre eux. Ce que nous retenons dépend de notre réaction émotionnelle à une expérience, de sa nouveauté, du lieu et du moment où l'événement s'est produit, de notre niveau d'attention et de motivation pendant l'événement, et du traitement de ces pensées et sentiments pendant le sommeil. En nous focalisant sur la synapse, nous avons construit une vision simpliste de la façon dont on apprend et enregistre les souvenirs associés.

De fait, le renforcement d'une synapse ne suffit pas à produire un souvenir, hormis pour les réflexes les plus élémentaires dans des circuits simples. De vastes changements dans tout le cerveau sont nécessaires pour créer un souvenir cohérent. Que vous vous souveniez de la conversation de la veille au soir avec vos invités ou que vous utilisiez une compétence acquise comme la pratique du vélo, les activités de millions de neurones dans de nombreuses régions différentes de votre cerveau >

© Eva Vasquez

> doivent se lier pour produire un souvenir cohérent qui mêle émotions, images, sons, odeurs, séquences d'événements et autres expériences mémorisées.

D'autres mécanismes cellulaires doivent être à l'œuvre. Forts de ce constat, les neuroscientifiques ont cherché de nouvelles voies pour expliquer comment l'information est transmise, traitée et stockée dans le cerveau durant l'apprentissage. Au cours des dix dernières années, ils ont compris que l'iconique «matière grise» qui constitue la surface extérieure du cerveau n'est pas la seule partie impliquée. Les zones situées sous cette surface grise et plissée jouent aussi un rôle essentiel dans l'apprentissage. Ces dernières années, une série d'études menées dans mon laboratoire et ailleurs ont élucidé ces processus, laissant entrevoir de nouvelles façons de traiter les troubles psychiatriques et du développement qui surviennent lorsque des difficultés à l'apprentissage se manifestent.

Si les changements synaptiques ne suffisent pas, que se passe-t-il dans votre cerveau quand vous apprenez quelque chose? Aujourd'hui, les méthodes d'imagerie par résonance magnétique (IRM) permettent aux chercheurs de voir à travers le crâne d'une personne et d'examiner la structure du cerveau. En analysant les clichés produits, les chercheurs ont commencé à remarquer des différences dans la structure du cerveau de personnes ayant des compétences spécifiques très développées. Les musiciens, par exemple, ont des régions du cortex auditif plus épaisses que les non-musiciens. Au départ, les chercheurs ont supposé que ces différences subtiles prédisposaient clarinettistes et pianistes à exceller dans leur domaine. Mais des recherches ultérieures ont montré que l'apprentissage modifie la structure du cerveau.

Par ailleurs, les apprentissages qui modifient le tissu cérébral ne concernent pas que les compétences sensorimotrices répétitives comme la pratique d'un instrument de musique. En 2006, le neuroscientifique Bogdan Draganski, aujourd'hui à l'université de Lausanne, en Suisse, et ses collègues ont constaté que chez des étudiants en médecine qui avaient étudié pour un examen, le volume de matière grise avait augmenté. Divers changements cellulaires pourraient causer une telle augmentation, comme la naissance de nouveaux neurones et de cellules non neuronales dites «gliales». Des remaniements vasculaires, ou encore la croissance et l'élagage des axones et des dendrites – les prolongements qui s'étendent à partir du corps d'un neurone –, pourraient faire de même.

Il arrive même que ces changements se produisent beaucoup plus vite que prévu durant l'apprentissage. En 2012, Yaniv Assaf, de l'université de Tel Aviv, et ses collègues ont montré que 16 tours de piste dans un jeu vidéo informatisé suffisaient pour induire des changements dans l'hippocampe des nouveaux joueurs. Le fait que la région cérébrale concernée soit l'hippocampe n'est pas surprenant: cette région est essentielle pour l'apprentissage spatial lié à la navigation. Dans d'autres études, enfin, Yaniv Assaf et, indépendamment, Heidi Johansen-Berg, de l'université d'Oxford, ont découvert que des changements survenaient dans des zones inattendues du cerveau, dont des régions dépourvues de neurones ou de synapses, connues sous le nom de «substance blanche».

DES MILLIARDS DE FAISCEAUX BLANCS

Le siège de la conscience est le cortex cérébral, la couche externe de 3 millimètres d'épaisseur du cerveau humain. La plupart des chercheurs s'attendaient donc à y trouver des modifications induites par l'apprentissage. Mais sous cette couche superficielle, des milliards de faisceaux d'axones très serrés (les fibres nerveuses), ressemblant en quelque sorte aux fibres enroulées sous la peau de cuir d'une balle de baseball, connectent les neurones de la matière grise en circuits. Ces faisceaux de fibres sont blancs, car les axones sont recouverts d'une substance graisseuse appelée «myéline», qui agit comme un isolant électrique et multiplie par 50 à 100 la vitesse de transmission des influx nerveux. Les lésions et maladies de la substance blanche constituent des champs importants de recherche, mais, jusqu'à récemment, on avait accordé peu d'attention à un éventuel rôle de la myéline dans le traitement de l'information et l'apprentissage.

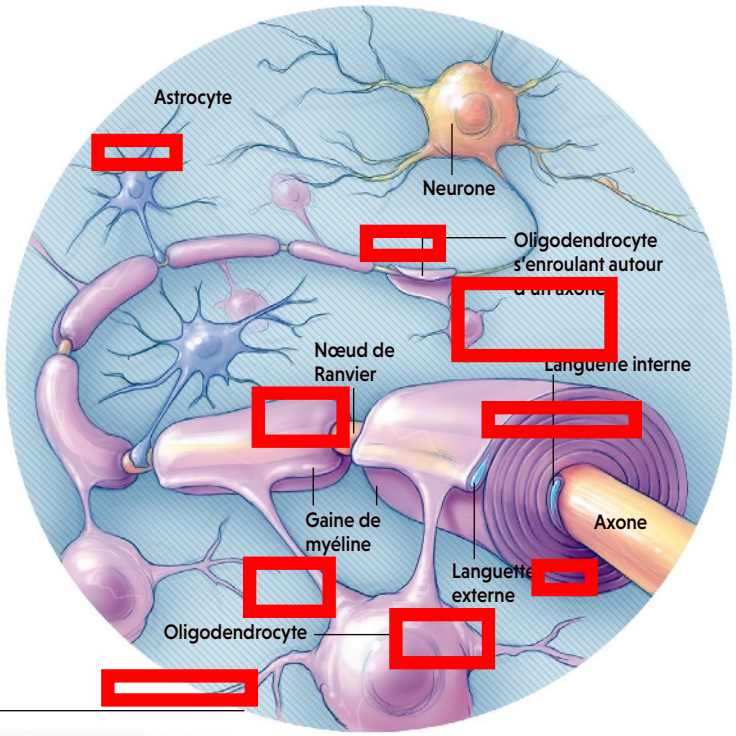
Au cours des dix dernières années, cependant, des études ont commencé à mettre en évidence, par imagerie cérébrale, des différences dans la substance blanche d'experts aux compétences variées, notamment de personnes ayant de grandes aptitudes en lecture et en arithmétique. La substance blanche de golfeurs confirmés et de jongleurs entraînés présentait aussi des différences par rapport à celle de novices, et on a même corrélé volume de substance blanche et quotient intellectuel. Si le traitement de l'information et l'apprentissage découlent du renforcement des connexions synaptiques entre les neurones de la matière grise, pourquoi l'apprentissage a-t-il un impact sur le câblage en profondeur du cerveau?

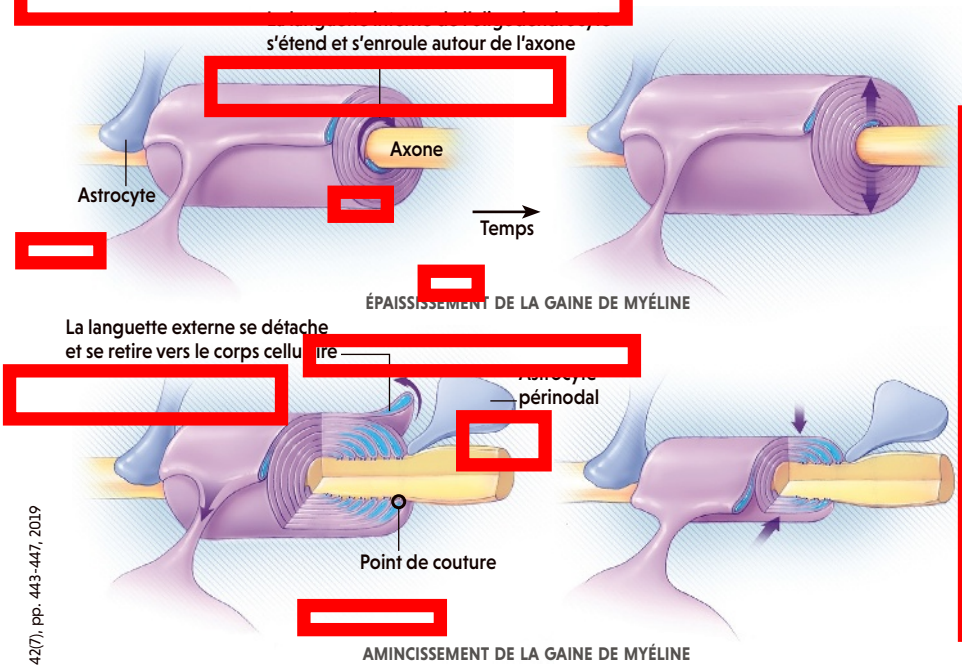
Une réponse a commencé à émerger d'études menées dans mon laboratoire à l'échelle cellulaire, visant à comprendre comment les synapses – mais aussi d'autres zones du cerveau – changent durant l'apprentissage. Il nous paraissait essentiel de regarder au-delà des synapses, car la plupart des médicaments dont on dispose pour traiter les troubles neurologiques et psychologiques agissent sur la

COMMENT LA MYÉLINE AGIT

Les points de connexion entre les neurones – les synapses – subissent des modifications lors de l'apprentissage. Mais de nouvelles recherches montrent que des changements de plasticité existent aussi dans la myéline, une partie de la substance blanche qui forme une gaine autour des longs filaments (les axones) que projettent les neurones.

DES CELLULES À L'ŒUVRE
Des cellules, les oligodendrocytes, enroulent une languette de myéline autour des axones. Ces gaines isolantes contrôlent la vitesse des signaux électriques le long des axones. De petits espaces sans myéline – les nœuds de Ranvier – contiennent des canaux ioniques dont l'ouverture permet la propagation des impulsions électriques. Un autre type de cellule, l'astrocyte périnodal, inhibe la sécrétion d'une enzyme, la thrombine (non représentée), qui détache la myéline de l'axone.





UNE ENVELOPPE DYNAMIQUE
Quand des neurones s'activent, des oligodendrocytes enroulent la gaine de myéline autour des axones. Le degré de myélinisation contrôle la vitesse de propagation des signaux le long des axones, les gaines plus épaisses accélérant la transmission. La thrombine coupe les « points de couture » qui lient la myéline à l'axone, et l'astrocyte périnodal ajuste l'épaisseur de la gaine en l'inhibant. Ces variations d'épaisseur assurent la synchronisation des signaux aux points de relais neuronaux, ce qui améliore les performances d'apprentissage.

transmission synaptique. Or il existe un besoin urgent d'agents plus efficaces. En se focalisant sur la transmission synaptique, on risque de passer à côté de meilleurs traitements contre la démence, la dépression, la schizophrénie ou le syndrome de stress post-traumatique.

Au début des années 1990, mon laboratoire, aux Instituts américains de la santé, et d'autres ont commencé à explorer la possibilité que les cellules gliales détectent l'information circulant dans les réseaux neuronaux et la modifient pour améliorer les performances. Les résultats expérimentaux accumulés depuis montrent que tous les types de cellules gliales réagissent à l'activité neuronale et sont capables de modifier la transmission de l'information dans le cerveau. L'une des découvertes les plus surprenantes concerne la myéline.

Cet isolant est formé de couches de membrane cellulaire enroulées autour des axones comme du ruban isolant électrique. Dans le cerveau et la moelle épinière, ce sont des cellules gliales en forme de pieuvre, les oligodendrocytes, qui assurent l'enroulement. Dans les membres et le tronc, il s'agit de cellules gliales en forme de saucisse, les cellules de Schwann. Nombre d'oligodendrocytes saisissent un axone et enroulent des couches de myéline tout autour en segments, comme les mains empilées de joueurs de baseball saisissant une batte pour déterminer quelle équipe frappera en premier. L'espace minuscule entre deux segments de myéline expose une section d'axone nu de 1 micromètre de long où se concentrent les canaux ioniques qui produisent les impulsions électriques. >

© David Cheney ; source : R. D. Fields et D. J. Dutta, Trends in Neurosciences, vol. 42(7), pp. 443-447, 2019

Ces espaces, nommés «nœuds de Ranvier», agissent comme des répéteurs bioélectriques : ils relayent les impulsions électriques, de nœud en nœud, le long de l'axone. La vitesse de transmission des impulsions augmente à mesure que des couches de myéline s'enroulent autour de l'axone, ces couches le protégeant mieux contre les pertes de tension. De plus, lorsque les segments de myéline encadrant un nœud de Ranvier le rendent plus étroit, une impulsion électrique s'y déclenche plus rapidement, car il faut moins de temps pour charger la petite quantité de membrane nodale jusqu'à la tension nécessaire pour ouvrir les canaux ioniques et produire l'impulsion.

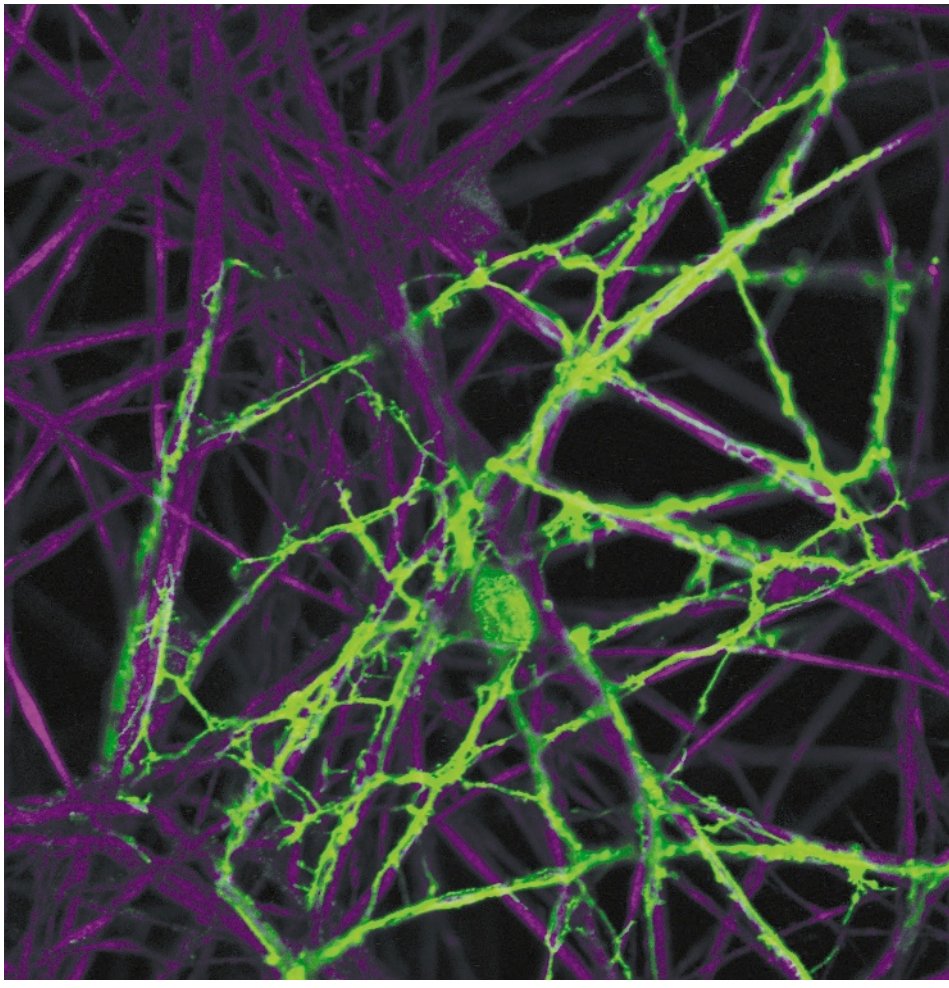
Les maladies qui endommagent la myéline, telles que la sclérose en plaques et le syndrome de Guillain-Barré, entraînent parfois de graves handicaps, car la transmission des impulsions nerveuses échoue lorsque l'isolant est altéré. Mais jusqu'à récemment, l'idée que des impulsions nerveuses puissent modifier la myéline en routine ne faisait pas l'unanimité. Et même si la structure de la myéline était modifiée, comment et pourquoi cela aurait-il amélioré les performances et l'apprentissage ?

SYNCHRONISER LES SIGNAUX ÉLECTRIQUES

L'explication se cachait sous nos yeux. Elle renvoie à la vieille maxime sur le câblage des neurones excités ensemble. Dans tout réseau complexe d'information ou de transport, l'heure d'arrivée aux points de relais est critique – pensez aux correspondances manquées à cause d'un train en retard.

Comment la vitesse de transmission dans chaque connecteur du cerveau humain est-elle réglée de façon qu'une impulsion arrive juste au moment voulu ? On sait que des signaux électriques se déplacent au rythme d'une marche lente dans certains axones, mais filent à la vitesse d'une voiture de course dans d'autres. Les signaux de deux axones qui convergent vers des neurones servant de points de relais n'arriveront ensemble que si le temps de parcours à partir de leur source est optimisé pour compenser les différences de longueur des deux axones et de vitesse des impulsions le long de chaque connecteur.

La myéline s'étant révélée un moyen particulièrement efficace pour accélérer la transmission des impulsions, la myélinisation des axones favoriserait donc une transmission optimale des informations à travers le réseau. Et si les oligodendrocytes détectent le trafic d'informations dans les circuits neuronaux et y réagissent, un rétrocontrôle de l'axone pourrait réguler la formation de la myéline et la façon dont elle ajuste la vitesse de transmission de l'impulsion. Cependant, comment les oligodendrocytes détectent-ils les impulsions nerveuses qui circulent dans les axones ?



Un oligodendrocyte *(en vert)* se prépare à enrober un axone *(en violet)* de myéline.

© R. D. Fields, NIH et NICHD

DES OLIGODENDROCYTES À L'AFFUT

Au cours des vingt dernières années, notre équipe et d'autres ont identifié de nombreux neurotransmetteurs et autres molécules de signalisation qui communiquent aux cellules gliales la présence d'une activité électrique dans l'axone et stimulent la myélinisation. Nos expériences ont montré que lorsqu'un neurone est excité, des neurotransmetteurs sont libérés non seulement au niveau des synapses, mais aussi tout le long de l'axone. Nous avons découvert que les prolongements des oligodendrocytes sondent les sections nues des axones à la recherche de neurotransmetteurs libérés par les axones excités. Lorsqu'un prolongement touche un axone excité, il forme un contact «par point de soudure», qui permet la communication entre l'axone et l'oligodendrocyte. Ce dernier commence alors à synthétiser de la myéline à cet endroit et l'enroule autour de l'axone.

De plus, lorsque nous avons donné aux oligodendrocytes en culture le choix entre myéliniser des axones électriquement actifs

traités à la toxine botulique pour empêcher la libération de neurotransmetteurs, les oligodendrocytes ont opté huit fois plus souvent pour les axones électriquement actifs plutôt que pour ceux qui étaient silencieux. Il est donc possible que, lorsqu'une personne apprend à jouer *La Lettre à Élise* au piano, des axones nus soient enveloppés de myéline ou que le volume des gaines de myéline existantes augmente dans les circuits activés de façon répétée durant la pratique, accélérant le flux d'informations dans les réseaux cérébraux. Par IRM, la nouvelle myéline apparaît alors sous la forme de modifications de la substance blanche dans des zones du cerveau nécessaires à la pratique musicale.

Récemment, plusieurs équipes ont vérifié que des potentiels d'action – les signaux se propageant le long des axones – stimulent la myélinisation des zones exposées de ces câbles neuronaux. En 2014, Michelle Monje, à l'université de Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont montré chez la souris que la stimulation optogénétique (une technique utilisant des lasers pour exciter les neurones) augmente la myélinisation dans le cerveau. La même année, William Richardson, de l'University College de Londres, et ses collègues ont démontré que lorsque l'on empêche la formation de nouvelle myéline chez des souris, celles-ci mettent plus de temps à apprendre à courir sur une roue dont certains barreaux ont été retirés. Enfin, en observant par microscopie confocale la formation de myéline chez des poissons zèbres vivants, l'équipe de David Lyons, à l'université d'Édimbourg, et celle de Bruce Appel, à l'université du Colorado à Denver, ont indépendamment observé que lorsqu'elles inhibaient la libération par les axones de petites vésicules contenant des neurotransmetteurs, souvent, les premières couches de myéline s'enlevaient et l'oligodendrocyte arrêtait tout le processus.

Par ailleurs, dans une étude publiée en janvier dernier avec Daisuke Kato, de la faculté supérieure de médecine de l'université de Kobe, au Japon, et d'autres collègues japonais, nous avons montré que la myéline favorise l'apprentissage en faisant en sorte que les différents potentiels d'action voyageant le long des axones arrivent en même temps dans le cortex moteur, la région du cerveau qui contrôle le mouvement. En utilisant des souris génétiquement modifiées pour que leur capacité de myélinisation soit altérée et qui avaient été entraînées à tirer un levier pour recevoir une récompense, nous avons découvert que l'apprentissage de cette tâche augmentait la myélinisation dans le cortex moteur.

De plus, en enregistrant les impulsions nerveuses à l'aide d'électrodes, nous avons constaté que les potentiels d'action étaient moins synchronisés dans le cortex moteur des souris présentant une myélinisation défectueuse. Nous avons ensuite stimulé la synchronisation des arrivées des potentiels d'action dans le cortex moteur en forçant les neurones à s'allumer au bon moment par optogénétique. Les souris présentant une myélinisation défectueuse ont alors effectué sans difficulté la tâche apprise. À terme, des formes moins invasives de stimulation cérébrale pourraient constituer une thérapie efficace contre les troubles neurologiques et psychologiques dus à une perturbation de la myélinisation.

UN MÉCANISME QUI RALENTIT L'INFLUX NERVEUX ?

Malgré ces avancées, il est possible que la stimulation cérébrale ne suffise pas toujours à permettre de nouveaux apprentissages. En effet, il doit exister une limite à la vitesse des potentiels d'action le long des axones, et donc à la capacité du cerveau à synchroniser l'arrivée de potentiels d'action aux points de relais critiques des réseaux neuronaux si certaines impulsions sont particulièrement rapides. Par conséquent, nous avons envisagé la possibilité qu'il existe aussi un moyen de ralentir les impulsions qui arrivent trop vite à ces points de relais.

Puisque la gaine de myéline autour des axones est capable d'accélérer de façon contrôlée la transmission des signaux en s'épaississant, les ralentirait-elle de même en s'amincissant? Avant nos travaux, on ne connaissait aucun mécanisme susceptible de valider un tel processus, hormis ceux liés aux maladies perturbant la myélinisation. Mais nos dernières recherches, publiées en 2018, ont révélé qu'un autre type de cellule gliale est impliqué dans ces modifications «plastiques» du système nerveux.

Près du nœud de Ranvier se trouve une cellule gliale appelée «astrocyte». Les astrocytes ont de nombreuses fonctions. En particulier, ce sont eux qui assurent l'approvisionnement des neurones en énergie, en prélevant du glucose dans les vaisseaux sanguins et en le transformant en lactate, le carburant des neurones, avant de le leur fournir. Cependant, la plupart des neuroscientifiques ne s'intéressent pas à ces cellules, car elles ne communiquent pas avec les >

Des influx ont le rythme d'une marche lente, d'autres celui d'une voiture de course

> autres *via* des impulsions électriques. Certes, au cours de la dernière décennie, des recherches ont montré que les astrocytes à proximité de la synapse entre deux neurones étaient capables de réguler la transmission synaptique durant un apprentissage en y libérant ou en y absorbant des neurotransmetteurs. Mais jusqu'à récemment, les biologistes spécialistes de la myéline avaient tendance à négliger ces cellules, et en particulier un type d'astrocytes qui pourtant entrent en contact avec les axones au niveau de leurs nœuds de Ranvier.

En quoi ces astrocytes dits « périnodaux » interviennent-ils dans l'amincissement de la gaine de myéline ? Comme on le ferait pour transformer un vêtement, ces cellules aident à couper les « coutures ». La gaine de myéline est attachée à l'axone par une jonction flanquant le nœud de Ranvier (*voir l'encadré page 23*). Au microscope électronique, ces jonctions apparaissent comme des spirales de points de couture entre l'axone et la myéline, et les fils qui constituent chaque point sont composés d'un complexe de trois molécules d'adhésion cellulaire. Notre analyse de la composition moléculaire de ces points de couture a montré que l'une de ces trois molécules, la neurofascine 155, présente un site qu'une enzyme spécifique, la thrombine, est capable de couper, ce qui amincit alors la myéline.

La thrombine est fabriquée par les neurones, mais elle pénètre aussi dans le cerveau à partir du système vasculaire. Quand la myéline se décolle de l'axone, la quantité d'axone dénudé au nœud de Ranvier augmente. La couche externe de myéline est attachée à l'axone juste à côté des astrocytes périnodaux. Lorsque la myéline s'est détachée de l'axone, sa couche externe se retire dans un oligodendrocyte, ce qui amincit la gaine. L'élargissement de l'espace nodal et l'amincissement de la gaine de myéline diminuent la vitesse de transmission des impulsions.

Nous avons découvert que l'astrocyte périnodal, en libérant un inhibiteur de la thrombine, est capable de contrôler la coupure des fils qui relient la myéline à l'axone. Nous avons mené des expériences sur des souris génétiquement modifiées pour que leurs astrocytes libèrent des quantités plus faibles de cet inhibiteur. En examinant leurs neurones au microscope électronique, nous avons constaté que la myéline s'était amincie et que l'espace nodal avait augmenté. En utilisant des amplificateurs électroniques pour détecter les impulsions nerveuses et mesurer leur vitesse de transmission, nous avons de plus constaté qu'après que l'épaisseur de la myéline a ainsi diminué, la transmission des impulsions dans le nerf optique était ralentie d'environ 20% et la vision des animaux réduite. Nous avons par ailleurs réussi à annuler tous ces effets en injectant des inhibiteurs de la thrombine – des molécules déjà approuvées pour le traitement de troubles vasculaires.

Nos expériences appuient une nouvelle hypothèse : les changements d'épaisseur de la gaine de myéline représentent une nouvelle forme de plasticité du système nerveux, régie par l'ajout et le retrait de myéline.

Les couches supplémentaires de myéline ne sont pas ajoutées aux axones comme on enroulerait du ruban adhésif autour d'un fil, car cela nouerait les bras des oligodendrocytes. Au lieu de cela, une nouvelle couche intérieure se construit en s'enroulant en spirale autour de l'axone comme un serpent glissant sous la myéline déjà présente. Pendant ce temps, l'astrocyte périnodal peut détacher la couche externe de myéline et amincir la gaine. L'épaisseur de la gaine de myéline n'est pas fixe ; elle reflète plutôt un équilibre dynamique entre l'ajout de couches tout contre l'axone et le retrait de la couche externe sous le contrôle de l'astrocyte.

RÉGLER LA FRÉQUENCE DES ONDES CÉRÉBRALES

La plasticité de la myéline pourrait aussi contribuer au fonctionnement des circuits neuronaux et à l'apprentissage d'une autre manière : en réglant la fréquence des oscillations des ondes cérébrales. Toute l'activité neuronale dans le cerveau ne provient pas d'entrées sensorielles. Une grande partie de cette activité est due à ce qui se passe dans le cerveau lui-même, aux niveaux conscient et inconscient. Cette activité autoproduite consiste en des ondes de différentes fréquences qui balaient le cerveau, tout comme la vibration du moteur d'une voiture roulant à une certaine vitesse fait brièvement balancer de conserve différentes parties du véhicule à des fréquences de résonance.

Ces ondes cérébrales, ou oscillations, sont considérées comme un mécanisme clé permettant de coupler des neurones de régions distantes du cerveau, ce qui peut être important

L'épaisseur variable de la gaine de myéline est une nouvelle forme de plasticité du système nerveux

pour le tri des informations nerveuses et leur transmission. Des oscillations, par exemple, relient l'activité neuronale dans le cortex préfrontal, qui fournit une signification contextuelle, et celle dans l'hippocampe, responsable de l'encodage des informations spatiales. Ce couplage permet à une personne de reconnaître rapidement un visage familier au travail, mais il rend aussi plus difficile l'identification du même collègue dans un endroit inconnu.

Plus important, il est possible d'identifier les différents stades du sommeil critiques pour le stockage de la mémoire à long terme, par les fréquences des ondes cérébrales produites durant ces périodes. Nos expériences accumulées durant la journée sont rejouées pendant le sommeil et triées, certaines étant stockées, d'autres effacées en fonction de leur relation avec d'autres souvenirs et émotions, susceptibles de les marquer comme potentiellement utiles. La fréquence des ondes cérébrales associées est essentielle à ce processus de consolidation de la mémoire. Mais la vitesse de transmission des impulsions est aussi cruciale pour leur synchronisation.

Tout comme deux enfants doivent coordonner précisément les mouvements de leurs jambes pour actionner une balançoire à bascule, les délais de transmission entre deux populations de neurones produisant des ondes cérébrales doivent être coordonnés afin que les neurones couplés oscillent de façon synchrone malgré la distance qui les sépare dans le cerveau. La plasticité de la myéline est importante dans ce processus, car seule une certaine vitesse de conduction dans les neurones permet de maintenir à la même fréquence les oscillations couplant deux régions du cerveau.

Cette conclusion est fondée sur une modélisation mathématique de la physique de propagation des ondes que j'ai réalisée en 2014 avec mes collègues Sinisa Pajevic et Peter Basser, des Instituts américains de la santé. Tout récemment, en 2020, une étude menée par Patrick Steadman et ses collègues dans le laboratoire de Paul Frankland, à l'université de Toronto, a apporté un soutien expérimental convaincant à cette idée.

En utilisant des souris génétiquement modifiées chez lesquelles la myélinisation pouvait être temporairement interrompue, les chercheurs ont découvert que la capacité d'apprendre à craindre un environnement dangereux et à se souvenir d'endroits sûrs dépend de la formation de nouvelle myéline. De plus, ils ont constaté que dans ce type d'apprentissage, un couplage de l'activité des ondes cérébrales pendant le sommeil s'opère entre l'hippocampe et le cortex préfrontal. Enfin, quand ils empêchaient la formation de nouvelle myéline, les connexions neuronales s'affaiblissaient et les souris présentaient un type de trouble de la mémoire souvent observé chez les personnes qui, après un événement traumatique, ont du mal à associer la peur au contexte approprié.

L'apprentissage de toute tâche complexe et son exécution impliquent le fonctionnement coordonné de nombreux neurones différents dans diverses régions du cerveau et nécessitent que les signaux traversent de grands réseaux neuronaux à une vitesse optimale. La gaine de myéline est cruciale pour une transmission optimale, mais en atteignant un âge avancé, les gens commencent à perdre de la myéline dans leur cortex cérébral. Cette dégradation progressive est l'une des raisons du ralentissement cognitif et de la difficulté croissante d'apprendre de nouvelles choses associés à la vieillesse.

DES TROUBLES COGNITIFS LIÉS À LA PERTE DE MYÉLINE

Songez aux perturbations des communications téléphoniques de longue distance dues aux retards de transmission. Les retards dans le cerveau ont un effet similaire. Ils peuvent engendrer des difficultés cognitives et une pensée désorganisée chez les personnes souffrant de troubles psychologiques tels que la schizophrénie. En effet, dans de nombreux troubles neurologiques et psychiatriques, on observe des différences dans les oscillations des ondes cérébrales. La maladie d'Alzheimer, notamment, est associée à des modifications de la substance blanche.

Des médicaments qui contrôlent la production de myéline pourraient fournir de nouvelles approches pour traiter ces problèmes. Mais comme de nombreuses formes d'activité neuronale influent sur la myélinisation, diverses autres techniques, comme l'entraînement cognitif, la rétroaction neuronale et la physiothérapie, pourraient aussi être utiles pour traiter le déclin cognitif et d'autres troubles liés à l'âge.

En janvier dernier, Jung-Hae Youn, de l'université Cha, en Corée du Sud, et ses collègues ont montré qu'à l'issue de dix semaines d'exercices d'entraînement de la mémoire, des personnes âgées avaient une meilleure mémoire que celles qui n'avaient pas suivi l'entraînement. De plus, l'imagerie cérébrale avant et après l'entraînement a révélé que l'intégrité des fibres de substance blanche reliées au lobe frontal était accrue chez le groupe de personnes âgées qui avait suivi l'entraînement.

Ces nouveaux concepts ont commencé à changer notre vision du cerveau. Longtemps considérée comme un isolant inerte des axones, la myéline est devenue un élément clé de l'apprentissage. Et peu à peu, l'aperçu tronqué du cerveau, centré sur la plasticité synaptique, que nous avions il y a encore quelques années, laisse la place à l'image d'un cerveau bien plus plastique encore qu'on ne le pensait. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. D. Fields et O. Etzkalo, **[illegible] memories**, *Nature Neuroscience*, 24 février 2020.

P. E. Steadman *et al.*, **Disruption of oligodendrogenesis impairs memory consolidation in adult mice**, *Neuron*, vol. 105(1), pp. 150-164.e6, 2020.

D. J. Dutta *et al.*, **Regulation of myelin structure and conduction velocity by perinodal astrocytes**, *PNAS*, vol. 115(46), pp. 11832-11837, 2018.

R. D. Fields, **A new mechanism of nervous system plasticity: activity-dependent myelination**, *Nature Review Neuroscience*, vol. 16(12), pp. 756-767, 2015.

BERNARD ZALC
est chercheur en neurosciences, directeur de recherche émérite à l'Inserm au sein de l'équipe Développement oligodendrocytaire et interactions neurovasculaires à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM), à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris.

Pour retenir, il faut myéliniser

La myéline, la substance blanche isolante qui entoure les fibres nerveuses, interviendrait non seulement dans l'apprentissage, mais aussi dans la mémorisation à long terme. Petit tour d'horizon avec Bernard Zalc, qui enquête sur cette étonnante matière depuis plus de quarante ans.

© DRFP – Odile Jacob

En général, les neurobiologistes préfèrent travailler sur les neurones. Pourquoi vous être tourné vers la myéline ?

Je suis arrivé dans l'unité Inserm de Nicole Baumann, à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, à la fin des années 1970, quand son équipe commençait à explorer des mutants de la souris comme modèles de maladies neurologiques. Certains mutants, en particulier, présentaient un trouble du développement de la gaine de myéline, qui entraînait un défaut de conduction de l'influx nerveux. Puis, avec ma propre équipe, j'ai continué à étudier les interactions des neurones et les cellules gliales productrices de myéline, les oligodendrocytes, lesquelles se sont révélées d'une grande richesse.

C'est ainsi qu'en 1996, avec Catherine Lubetzki, nous avons montré dans une culture de neurones et d'oligodendrocytes qu'en inhibant l'activité électrique des neurones, on inhibait la myélinisation, et inversement. Pour la première fois, on montrait que l'activité électrique dans les neurones est un inducteur de myélinisation. L'équipe de Douglas Fields aux États-Unis, a obtenu le même résultat en 1998.

Que s'est-il passé ensuite ?

Ces travaux sont passés inaperçus jusqu'à ce qu'en 2014, Michelle Monje, à l'université Stanford, les confirme à son tour en utilisant l'optogénétique (l'activation des neurones par des lasers, *voir l'article de Douglas Fields, page 20 à 27*). Depuis, d'autres études ont appuyé ces résultats et c'est devenu un sujet à la mode. De notre côté, nous avons poursuivi nos travaux. Notamment, à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM), nous avons la chance de disposer de la magnétoencéphalographie, technique qui permet de mesurer le champ magnétique dans le cerveau. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) donne de très belles images, mais qui ont une résolution temporelle de l'ordre de la seconde. Il peut se passer beaucoup de choses dans le cerveau en une seconde ! La magnétoencéphalographie, en revanche, a une résolution de l'ordre de la milliseconde.

Nous avons ainsi montré que si l'on démyélinise le nerf optique, le signal du champ magnétique qui se dirige vers le cortex visuel (le champ magnétique engendré par le courant électrique produit dans le nerf optique) est retardé. Céline Louapre et Catherine Lubetzki, au centre d'investigation clinique en neurosciences du groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, ont d'ailleurs démarré un essai clinique (ONSTIM) sur les névrites optiques, qui sont l'une des formes d'atteinte de la myéline dans le nerf optique. L'idée est de stimuler la cornée pour voir si, en donnant des décharges électriques, on favorise la remyélinisation de ces lésions. Les premiers résultats devraient arriver en 2022.

Les travaux de Douglas Fields et ses collègues suggèrent que la myéline régule la vitesse de conduction de l'influx nerveux. À quand remonte cette idée ?

Les premiers à avoir eu des résultats dans ce sens sont Paola Arlotta, à l'université Harvard, et ses collègues. En 2014, ils ont prouvé que, contrairement à ce qu'on pensait, le long des axones, la succession des zones non myélinisées (nœuds de Ranvier) et myélinisées (internœuds) n'est pas régulière : il existe des endroits dans le cortex où les nœuds de Ranvier sont plus longs. On pensait qu'un internœud mesurait environ 100 micromètres dans le système nerveux central (entre 700 micromètres et 1 millimètre dans le système nerveux périphérique) contre 1 à 2 micromètres pour les nœuds de Ranvier. En examinant au microscope électronique des neurones du néocortex de souris, l'équipe de Paola Arlotta a montré qu'en fait, chaque neurone a son propre profil de myélinisation. Les zones sans myéline ralentissant la conduction de l'influx nerveux, les neurobiologistes (dont Paola Arlotta) ont interprété ces résultats en émettant l'hypothèse que ces différents profils de myélinisation permettaient de réguler la vitesse de conduction de façon que les signaux électriques venant de différents endroits arrivent en même temps sur leur cible.

Un an plus tard, Benedikt Grothe, à l'université Louis-et-Maximilien de Munich, et ses collègues en ont fait une superbe démonstration dans le système auditif. Chez des gerbilles, ils ont montré que les axones qui répondaient mieux aux sons de basses fréquences présentaient des gaines de myéline plus épaisses et plus étendues que ceux répondant aux hautes fréquences. Et à l'aide de simulations, ils ont calculé que cette géométrie aide à ajuster la vitesse de conduction des signaux électriques dans le circuit neuronal.

Comment se positionnent les travaux de Douglas Fields dans ce contexte ?

Depuis ces recherches, la plupart des neurobiologistes pensent que c'est la régulation de la taille des nœuds de Ranvier qui contrôle la vitesse de conduction de l'influx nerveux dans les circuits neuronaux. Dès le départ, les gaines de myéline se mettraient en place à certaines distances des gaines adjacentes, ce qui réguleraient la taille des nœuds. Douglas Fields ne dit pas le contraire, mais propose un autre mécanisme : d'autres cellules gliales, les astrocytes, réguleraient le nombre de couches des gaines de myéline. « Débobiner » la gaine de quelques tours permettrait de diminuer son épaisseur tout en augmentant la taille des nœuds de Ranvier, et donc de réguler la vitesse de propagation de l'influx nerveux. C'est une possibilité, mais la façon dont les couches libérées sont réabsorbées par les oligodendrocytes n'est pas encore très claire.

>

> En supposant que c'est possible, quelle pourrait être la temporalité de ce mécanisme ?

Difficile de répondre. On sait que chez le poisson-zèbre, un enroulement complet d'une dizaine de tours ne nécessite que quelques heures…

Envisage-t-on d'autres pistes pour expliquer comment la myéline régule la vitesse de conduction de l'influx ?

En janvier dernier, une équipe sous la direction de Maarten Kole, de l'Institut néerlandais pour les neurosciences, à Amsterdam, a proposé l'existence d'un deuxième système de conduction de l'influx nerveux le long des axones myélinisés. En combinant des mesures de l'influx nerveux, l'observation des neurones par microscopie électronique et de la modélisation, ces chercheurs ont mis en évidence une zone nanométrique conductrice entre l'axone et la gaine de myéline qui participerait à la propagation des signaux électriques de nœud en nœud. Cela reste à confirmer.

Une autre question importante a par ailleurs récemment reçu une réponse de deux équipes : comment un même neurone myélinisé peut-il s'activer plusieurs fois ? Dans un neurone (ou toute autre cellule) au repos, la membrane est polarisée : les charges électriques de part et d'autre de la paroi, liées aux ions présents de chaque côté, diffèrent, ce qui confère à la membrane un potentiel au repos de quelques dizaines de millivolts. Lors du passage d'un influx nerveux, des canaux situés dans la membrane axonale et perméables aux ions sodium s'ouvrent et laissent entrer ces ions. Ce courant transmembranaire dépolarise temporairement la membrane. C'est cette dépolarisation qui, en se transmettant de proche en proche le long de l'axone, entraîne la propagation de l'influx nerveux. Puis la membrane retrouve rapidement sa polarisation grâce à des canaux perméables aux ions potassium qui s'ouvrent et laissent sortir ces ions. Le neurone est alors prêt à être excité de nouveau.

Toutefois, dans un axone myélinisé, la situation est un peu plus compliquée : les canaux sodiques sont situés au niveau des nœuds de Ranvier (d'où la propagation de l'influx nerveux de nœud en nœud), mais les canaux potassiques sont à un autre endroit, dans les internœuds, sous la gaine de myéline. Comment, alors, se rétablit le potentiel de la membrane ? Fin 2019, les équipes de Jianguo Gu, de l'université d'Alabama de Birmingham, et de Roderick McKinnon, de l'université Rockefeller à New York, ont indépendamment montré que d'autres canaux potassiques situés aux nœuds de Ranvier et sensibles non pas au voltage mais à des stimuli mécaniques, seraient responsables du rétablissement du potentiel au repos de la membrane.

Comment l'idée que la myéline intervient dans l'apprentissage s'est-elle imposée ?

Les premiers travaux qui l'ont montré ont été ceux de Heidi Johansen-Berg, à l'université d'Oxford. Il s'agissait de résultats indirects, mais qui ont frappé l'imagination. En 2009, l'équipe a observé que des jongleurs avaient une épaisseur de gaine de myéline plus importante dans une certaine zone du cerveau (sous le sillon intrapariétal) que des personnes qui ne jonglaient pas. Puis une équipe suédoise a effectué un travail similaire en comparant des adolescents faisant une heure de piano par jour à d'autres qui pratiquaient six heures par jour. De même, elle a montré que la substance blanche était plus importante dans certaines zones cérébrales de ces derniers. Cela a été le début de toutes sortes de travaux, dont ceux de l'équipe de William Richardson, à l'University College de Londres, en 2014, où des souris apprenaient à faire tourner une roue privée de quelques barreaux. Quand leur capacité de myéliniser des neurones était inhibée, les souris apprenaient plus lentement (*voir l'article de Douglas Fields*).

Ces études étaient les premières montrant qu'au cours de l'apprentissage, il y a synthèse de gaine de myéline, ce qui stabilise et accélère la vitesse de conduction des fibres mises en place quand on acquiert ce savoir-faire. Puis une autre découverte a marqué les esprits. On s'est aperçu que même les adultes produisent de nouveaux oligodendrocytes. On a commencé par croire qu'ils venaient remplacer de vieux oligodendrocytes qui mouraient. Or il se trouve que, justement, ils ne meurent pas. En fait, les nouveaux oligodendrocytes viennent myéliniser des circuits qui ne l'étaient pas. Il s'agit donc vraiment d'apprentissage. Et même de mémoire, comme l'a montré tout récemment l'équipe de Paul Frankland, à l'université de Toronto, à l'aide d'une piscine de Morris.

> **Tout au long de la vie, la myélinisation est un moteur de l'apprentissage**

De quoi s'agit-il ?

C'est un test cognitif de mémorisation imaginé par le neuroscientifique écossais Richard

Dans cet ouvrage, Bernard Zalc et Florence Rosier proposent un voyage passionnant et didactique dans le monde myélinisé.

Morris dans les années 1980. Dans une piscine ronde à bord vertical, on place une petite plateforme à fleur d'eau et invisible. Quand on dépose un rat ou une souris dans l'eau, l'animal n'a d'autre choix que de nager jusqu'à ce qu'il trouve la plateforme et monte dessus. Mais si vous répétez cette même expérience tous les jours, l'animal finit par mémoriser l'endroit où se situe la plateforme et s'y rend directement, quel que soit l'endroit où vous le mettez au départ. D'une part, l'équipe de Paul Frankland a montré que les souris qui acquièrent cette capacité synthétisent de nouveaux oligodendrocytes, et donc de nouvelles gaines de myéline. D'autre part, et c'est plus intéressant encore, elle a observé que si l'on inhibe la myélinisation pendant cette période d'apprentissage (les souris produisent toujours des précurseurs des oligodendrocytes, mais ceux-ci ne peuvent plus devenir matures et produire de la myéline), les souris apprennent toujours correctement, mais un mois plus tard, elles sont incapables de retrouver la plateforme, contrairement aux souris contrôles, qui la retrouvent immédiatement.

La myéline interviendrait donc dans la mémoire à long terme ?

Absolument. C'est la première fois que l'on met en évidence le fait que les circuits de la mémoire sont myélinisés et peuvent se myéliniser chez l'adulte. Ce travail a été confirmé par Jonah Chan, de l'université de Californie à San Francisco, et ses collègues. Cette découverte est très importante. Cela pourrait notamment aider à mieux comprendre les troubles cognitifs observés au cours des maladies qui touchent la myéline, comme la sclérose en plaques.

Ces maladies sont associées à des pertes de mémoire ?

Il est vrai que la sclérose en plaques, par exemple, se manifeste surtout par un handicap moteur, des troubles digestifs et des douleurs. Mais quand on suit des patients, on s'aperçoit que nombre d'entre eux ont aussi des problèmes cognitifs. On n'a jamais trop compris pourquoi, et voici la démonstration que ces troubles cognitifs sont dus au fait que des circuits neuronaux doivent être myélinisés pour mettre en place les apprentissages cognitifs perturbés chez ces patients.

Des troubles de la myéline seraient-ils aussi impliqués dans des maladies psychiatriques ?

Il est très difficile de répondre à cette question, essentiellement parce qu'on manque de modèles expérimentaux. Pour modéliser la dépression, par exemple, on met des souris en isolement. On n'a rien trouvé de mieux, mais cela ne reproduit pas exactement l'état de santé d'un patient déprimé. Quant aux interprétations des observations faites chez les humains, elles laissent les chercheurs dubitatifs. Que conclure quand on observe que chez les schizophrènes, le diamètre du corps calleux est réduit ? Qu'ils fabriquent moins de myéline ou qu'ils la perdent parce qu'ils ont perdu des neurones et donc leur gaine ?

Existe-t-il un lien entre problèmes de myélinisation et maladie d'Alzheimer ou, à l'inverse, la myéline protégerait-elle les neurones contre cette maladie ?

En 1996, des chercheurs de l'université J. W. Goethe, à Francfort – Heiko et Eva Braak – ont avancé une idée intéressante. Selon eux, les zones où les pertes de neurones sont les plus précoces chez les patients atteints de la maladie sont celles qui, au cours du développement, ont été myélinisées en dernier. En gros, il y aurait deux gradients dans le cerveau : un gradient de myélinisation qui va du tronc cérébral vers l'avant du cerveau et un gradient de perte neuronale qui va en sens inverse. En d'autres termes, plus une région a été myélinisée tôt, plus elle est protégée de la perte neuronale liée à la maladie d'Alzheimer. Mais il s'agit juste d'un constat, sur des patients, sans explication.

Avec toutes ces avancées, la myéline est-elle toujours le parent pauvre des neurosciences ?

Les neurobiologistes sont encore loin d'avoir une vision d'ensemble de tout ce qui se passe lors de l'apprentissage et de la mémorisation, mais on peut dire deux choses. La première, c'est que la myélinisation est un moteur de l'apprentissage et ce tout au long de la vie. La seconde, c'est que pour retenir, il faut myéliniser, sinon on oublie. La myéline joue donc un rôle fondamental dans deux fonctions clés du cerveau. Il reste à comprendre comment la taille des nœuds de Ranvier s'établit et comment les cellules « savent » ce qu'elles doivent faire, quels signaux orchestrent tout à la milliseconde près. On n'a pas encore d'explication à ce phénomène fascinant. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

B. Zalc et F. Rosier, **La myéline, le turbo du cerveau**, Odile Jacob, 2016.

S. Pan *et al.*, **Preservation of a remote fear memory requires new myelin formation**, *Nature Neuroscience*, en ligne le 10 février 2020.

F. Wang *et al.*, **Myelin degeneration and diminished myelin renewal contribute to age-related deficits in memory**, *Nature Neuroscience*, en ligne le 10 février 2020.

P. E. Steadman *et al.*, **Disruption of oligodendrogenesis impairs memory consolidation in adult mice**, *Neuron*, vol. 105 (1), pp. 150-164.e6, 2020.

C. C. H. Cohen *et al.*, **Saltatory conduction along myelinated axons involves a periaxonal nanocircuit**, *Cell*, vol. 180(2), pp. 311-322.e15, 2020.

S. G. Brohawn *et al.*, **The mechanosensitive ion channel TRAAK is localized to the mammalian node of Ranvier**, *eLife*, vol. 8, article e50403, 2019.

H. Kanda *et al.*, **TREK-1 and TRAAK are principal K+ channels at the nodes of Ranvier for rapid action potential conduction on mammalian myelinated afferent nerves**, *Neuron*, vol. 104(5), pp. 960-971.e7, 2019.

C. Demerens *et al.*, **Induction of myelination in the central nervous system by electrical activity**, *PNAS*, vol. 93(18), pp. 9887-9892, 1996.

L'ESSENTIEL

> Fin 2019, l'Observatoire européen austral (ESO) a commencé la construction du *Télescope géant européen (ELT)*. Ce sera le plus grand télescope optique de l'histoire de l'astronomie.

> L'*ELT* démarrera ses observations en 2025. Il accédera à des objets extrêmement ténus et lointains avec des résolutions de l'ordre de la milliseconde d'arc.

> La construction et le fonctionnement d'un télescope aussi grand présentent de très nombreux défis techniques.

LES AUTEURS

XAVIER BARCONS
directeur général de l'ESO

JUAN CARLOS GONZÁLEZ ALEXANDRE
directeur de l'ingénierie des systèmes pour le projet de construction de l'*ELT*

AUGUSTÍN SÁNCHEZ LAVEGA
professeur de physique appliquée à l'université du Pays basque, à Bilbao, et membre de l'équipe scientifique de l'*ELT*

ELT
Le plus grand œil de la planète

Du Système solaire aux premières étoiles de l'Univers, le télescope géant européen ELT observera dans quelques années le cosmos avec un luxe de détails sans précédent.

© ESO

DES ÉTOILES ARTIFICIELLES

Les télescopes actuels disposent de systèmes d'optique adaptative qui corrigent en temps réel les distorsions de l'image dues aux turbulences atmosphériques. Pour cela, ils doivent observer en continu des étoiles suffisamment brillantes qui servent de référence. Mais de telles étoiles sont assez rares. C'est pourquoi l'ELT disposera de huit lasers avec lesquels il générera autant d'étoiles artificielles dans n'importe quelle partie de la voûte céleste.

En 1610, Galilée pointa vers le ciel une lunette de quelques centimètres de diamètre et observa pour la première fois les lunes de Jupiter. Cette découverte a soulevé un coin de voile sur la véritable organisation de notre environnement cosmique proche. Elle a aussi constitué la naissance de l'astronomie observationnelle moderne: l'étude de l'Univers à l'aide d'instruments toujours plus puissants et précis.

Depuis, les découvertes n'ont cessé de se succéder. Trois siècles après l'exploit de Galilée, la mise en service du télescope de 2,5 mètres de diamètre à l'observatoire du mont Wilson a permis de mesurer la distance de nombreuses galaxies et d'établir la réalité de l'expansion de l'Univers. À la fin des années 1950, le télescope de 5 mètres du mont Palomar a contribué à la détection des quasars, ces noyaux actifs de galaxies dont les astronomes se servent aujourd'hui pour sonder les confins de l'Univers observable. En 2004, le *VLT* (*Very Large Telescope*), de 8,2 mètres, construit au Chili, a réalisé la première image d'une planète située hors du Système solaire.

UN OBSERVATOIRE GIGANTESQUE DANS LE DÉSERT CHILIEN

Ce ne sont là que quelques exemples. La construction de télescopes toujours plus grands a, à chaque fois, repoussé un peu plus loin notre compréhension de l'Univers. C'est pourquoi, il y a près de vingt ans, l'Organisation européenne pour les observations astronomiques dans l'hémisphère austral (plus connue sous le nom d'Observatoire européen Austral ou ESO) a entamé l'étude préliminaire de l'instrument qui, dans très peu de temps, sera le plus grand télescope optique de l'histoire: le *Télescope géant européen* ou *ELT*, pour l'anglais *Extremely Large Telescope*.

Cet observatoire gigantesque sera installé sur le Cerro Armazones, dans le désert chilien de l'Atacama, et on espère qu'il verra sa première lumière en 2025. En plus de son instrumentation de pointe, l'aspect le plus notable de ce nouveau télescope sera son miroir primaire dont le diamètre atteindra presque 40 mètres – sa surface sera équivalente à celle de trois terrains de basket.

De telles dimensions sont inédites dans l'histoire de l'astronomie et impliquent un saut qualitatif par rapport aux plus grands instruments actuellement en service. Les deux télescopes de l'observatoire *Keck*, à Hawaï, et le *Grand Télescope des Canaries*, ou *GTC*, sur l'île de la Palma (le plus grand engin de ce type en fonctionnement aujourd'hui), disposent de miroirs dont les diamètres sont de l'ordre de 10 mètres et les surfaces 14 fois inférieures à celle du futur miroir principal de l'*ELT*.

La construction d'un observatoire de cette taille nécessite de relever une longue série de défis techniques. Cependant, à l'image de ce qui s'est passé lors de la transition des miroirs de 2 à 4 mètres, puis des miroirs de 4 à 8 et 10 mètres, les progrès techniques dans ce domaine rendent désormais cet objectif à la fois techniquement et financièrement viable.

La justification scientifique de ce saut qualitatif réside dans le fait que pour un télescope – un instrument astronomique qui exploite la réflexion de la lumière, comme l'*ELT* –, le diamètre du miroir primaire détermine deux caractéristiques essentielles: la quantité de lumière qu'il capte et son pouvoir de résolution.

L'instrument est capable d'observer des objets d'autant plus ténus et éloignés que la première de ces caractéristiques, la quantité de lumière recueillie, est grande. Quant à la seconde, la résolution, elle mesure sa capacité à distinguer l'un de l'autre deux objets très proches sur la voûte céleste. Les lois de l'optique indiquent que la quantité de lumière reçue augmente en raison de l'aire du miroir, tandis que le pouvoir de résolution le fait en proportion du rayon. Par conséquent, ces deux quantités seront respectivement 14 et 4 fois plus élevées pour l'*ELT* que pour le *GTC*.

L'*ELT* observera une plage du spectre électromagnétique allant du visible à l'infrarouge proche. Ce type d'astronomie qualifiée «d'optique» (par opposition à l'astronomie X ou à la radioastronomie, par exemple) est

Un emplacement idéal: l'*ELT* s'élèvera au sommet du Cerro Armazones, dans le désert chilien de l'Atacama. À 3 000 mètres d'altitude, le lieu se distingue par l'exceptionnelle qualité de son ciel. Cette image aérienne récente montre l'état d'avancement des travaux de terrassement

© ESO

Les systèmes optiques et mécaniques de l'ELT constituent un gigantesque défi

particulièrement adapté à l'étude des étoiles ou des galaxies. Les caractéristiques de l'*ELT* lui permettront notamment d'analyser l'atmosphère des exoplanètes et d'y chercher des indices d'activité biologique. Il sera capable de détecter la structure et la composition de galaxies lointaines, d'observer en détail les effets des trous noirs supermassifs tapis au centre des galaxies, et de mesurer directement l'accélération de l'expansion cosmique. Les objectifs scientifiques de l'*ELT* sont nombreux, divers et ils transformeront nos connaissances dans tous les domaines de l'astronomie et de l'astrophysique, du plus proche au plus lointain.

UN PROJET EUROPÉEN QUI S'EST CONCRÉTISÉ EN 2014

À une époque où il n'y a plus de course à l'espace entre les grandes puissances, il n'est pas étonnant que la coopération internationale règne quand il s'agit de construire de grands observatoires. De ce point de vue, l'Europe a pris l'initiative en 1962 lors de la création de l'ESO, auquel adhèrent désormais 16 pays. Ce geste, qui était il y a plus d'un demi-siècle un acte de survie pour l'astronomie européenne, a fini par la placer à la première place mondiale dans le domaine de l'observation depuis le sol. L'effort n'a pas été vain. Le plus puissant complexe d'astronomie optique du monde est actuellement le *VLT*, un ensemble de quatre télescopes de 8,2 mètres de diamètre installés par l'ESO dans son observatoire du Cerro Paranal, dans le désert de l'Atacama, région réputée pour être la plus aride de la planète.

Du côté de l'astronomie des grandes longueurs d'onde, la coopération internationale a battu des records avec la construction d'*Alma*, ou *Grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique de l'Atacama* (l'acronyme anglais *Alma* signifie «âme» en espagnol), un radiotélescope de 66 antennes né de la collaboration de l'Europe (ESO), de l'Amérique (États-Unis et Canada) et de l'Asie (Japon, Taïwan et Corée du Sud). Cette installation inaugurée en 2013 offre des possibilités uniques d'observation de l'Univers froid (gaz et poussière interstellaire, disques protoplanétaires, etc.) et fait l'objet d'une intense compétition entre équipes d'astronomie pour obtenir du temps d'observation.

Toutefois, lorsqu'il s'est agi d'accéder à la prochaine génération de télescopes optiques, la stratégie à l'origine du succès d'*Alma* n'a pas été reproduite. Il existe actuellement trois projets de construction de télescopes géants dotés de miroirs de plus de 20 mètres de diamètre. Deux d'entre eux, le *Giant Magellan Telescope* ou *GMT* (24 mètres) et le *Thirty Meter Telescope* (*TMT*) sont à l'initiative de différents instituts de recherche américains. L'Europe, de son côté, a misé depuis des années sur l'*ELT*.

Après une longue période d'études préliminaires sur différents concepts, l'ESO a opté pour un système fondé sur un miroir de 39,3 mètres. En 2010, il a été décidé de l'installer sur le Cerro Armazones. Le terrain, situé à une altitude de 3060 mètres, a été accordé par le gouvernement chilien à l'ESO dans le but d'y installer cet observatoire. En plus de l'excellente qualité du ciel, le fait qu'Armazones et Paranal se trouvent à moins de 20 kilomètres l'un de l'autre permettra d'opérer l'*ELT* comme un instrument de l'observatoire de Paranal.

Le coût direct de la construction de l'*ELT* est estimé à 1,2 milliard d'euros, financé par les pays membres de l'ESO. À la différence des projets américains, l'ESO a décidé de ne pas démarrer la construction de l'*ELT* avant de s'être assuré de 90 % de son financement, un objectif atteint en 2014. En 2015, la route d'accès au Cerro Armazones a été achevée et le terrassement du sommet pour accueillir le gros œuvre a débuté. Après le creusement des fondations, terminé en 2018, les étapes suivantes seront le coulage du béton et l'installation des systèmes d'amortissement antisismiques. Suivra la construction du bâtiment de service et de la coupole où sera ensuite installée la monture du télescope.

Le véritable cœur de l'*ELT*, l'ensemble de ses systèmes optiques et mécaniques, constitue un gigantesque défi. Au moment où nous écrivons, l'industrie européenne est déjà à pied d'œuvre pour produire l'ensemble de ses éléments, y compris les miroirs, leurs supports, les actionneurs, capteurs et bien d'autres. La première lumière pour des calibrages techniques est prévue pour 2025; après quoi, l'instrumentation sera installée afin de démarrer les opérations scientifiques en 2026.

L'*ELT* sera essentiellement composé du télescope, de son instrumentation scientifique et de leurs structures de support respectives. La fonction du télescope est de collecter la lumière visible et infrarouge émise par l'objet étudié et, >

> moyennant une succession de six miroirs (le primaire et cinq miroirs secondaires), de former une image dans le plan focal. Celle-ci s'étendra sur une surface d'environ 2 mètres de diamètre, correspondant à 10 minutes d'arc dans le ciel (environ un tiers du diamètre de la pleine lune).

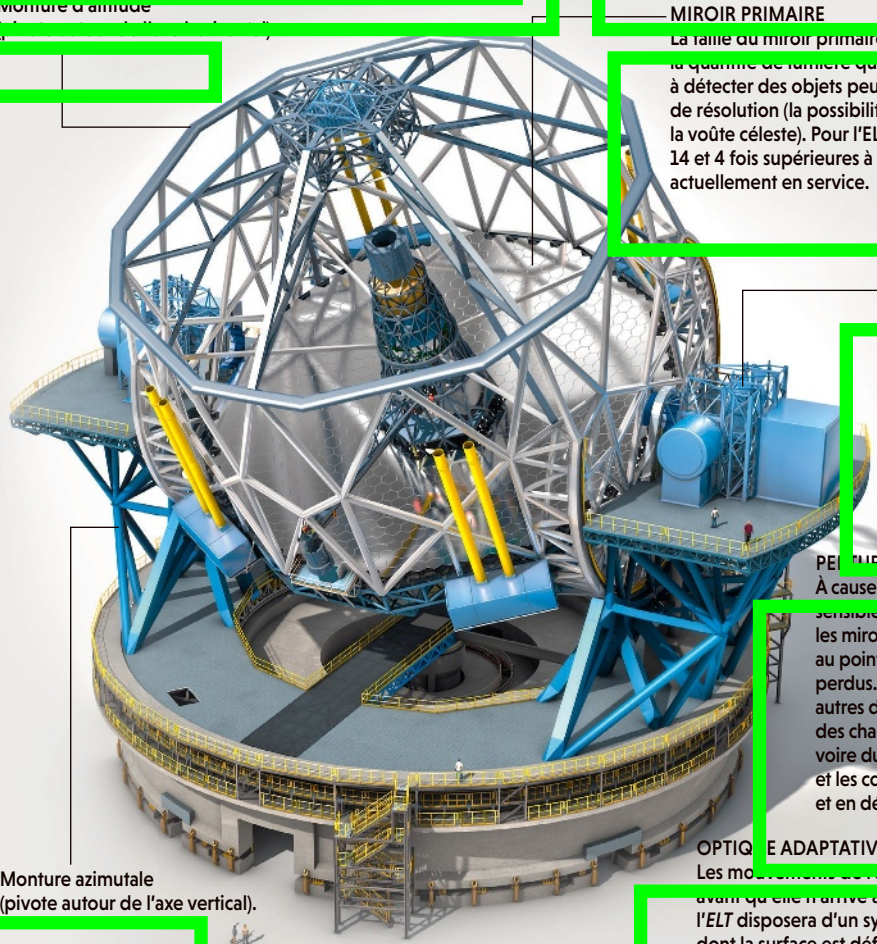
HUIT INSTRUMENTS

Les instruments scientifiques sont chargés de traiter l'image produite par le télescope selon les besoins (imagerie, spectroscopie, coronographie, etc.). Afin de maximiser l'efficacité de l'observatoire, le télescope compte huit stations focales permettant d'installer jusqu'à huit instruments différents (bien qu'un seul puisse être actif à chaque instant). Si le télescope et ses structures de support sont des éléments pérennes maintenus tout au long de la vie utile de l'observatoire (en général plusieurs décennies), les instruments ont une vie plus courte, de l'ordre de dix ans. C'est cette évolution de l'instrumentation qui permet aux observatoires astronomiques de se maintenir en permanence à la pointe de la recherche scientifique.

Grâce à son gigantesque miroir primaire, l'*ELT* sera capable de distinguer deux objets séparés dans le ciel d'à peine 5 millisecondes d'arc. Cela représente un pouvoir de résolution 12000 fois supérieur à celui de l'œil humain, 16 fois supérieur à celui du télescope spatial *Hubble* et 4 fois supérieur à celui du *GTC*. Quant à la quantité de lumière captée, qui détermine sa sensibilité, l'*ELT* disposera d'une surface collectrice de 978 mètres carrés, face aux 655 du *TMT*, aux 368 du *GMT*, aux 74 du *GTC* ou aux 4,5 de *Hubble*.

COMMENT FONCTIONNE UN TÉLESCOPE DE 40 MÈTRES

La principale caractéristique de l'*ELT* sera son immense miroir primaire d'un diamètre de 39,3 mètres. L'observatoire sera aussi équipé de différents instruments qui lui permettront d'analyser la lumière émise par les objets célestes. De par ces dimensions colossales, le principal défi sera de contrecarrer les différentes perturbations que subira le télescope, aussi bien du fait de sa propre structure que des perturbations atmosphériques. Ce schéma montre la structure interne – sans la coupole de protection – de l'observatoire.



Monture azimutale (pivote autour de l'axe vertical).

MIROIR PRIMAIRE
La taille du miroir primaire détermine deux grandeurs cruciales : la quantité de lumière que collecte le télescope (et donc sa capacité à détecter des objets peu lumineux et lointains) et son pouvoir de résolution (la possibilité de séparer deux objets très proches sur la voûte céleste). Pour l'ELT, ces grandeurs seront respectivement 14 et 4 fois supérieures à celles du plus grand télescope optique actuellement en service.

INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE
Une fois collectée la lumière de l'objet astronomique étudié, divers instruments se chargeront de l'analyser en fonction des propriétés recherchées. Les premiers installés seront la caméra infrarouge *Micado*, le spectrographe visible et infrarouge *Harmoni* et la caméra spectrographique infrarouge *Metis*.

PERTURBATIONS
À cause de ses grandes dimensions, l'*ELT* sera très sensible aux perturbations affectant la structure et les miroirs. Faute de les corriger, l'image serait dégradée au point que les avantages d'un télescope géant seraient perdus. De telles perturbations peuvent provenir entre autres du poids de la monture en altitude elle-même, des changements ou des différences de température, voire du vent. Un système automatisé les détecte et les corrige en temps réel en déformant et en déplaçant les miroirs.

OPTIQUE ADAPTATIVE
Les mouvements de l'air troublent la lumière des objets célestes avant qu'elle n'arrive au télescope. Pour éviter ces effets, l'*ELT* disposera d'un système d'optique adaptative : un miroir dont la surface est déformable corrige en temps réel les déformations de l'image provoquées par les turbulences atmosphériques.

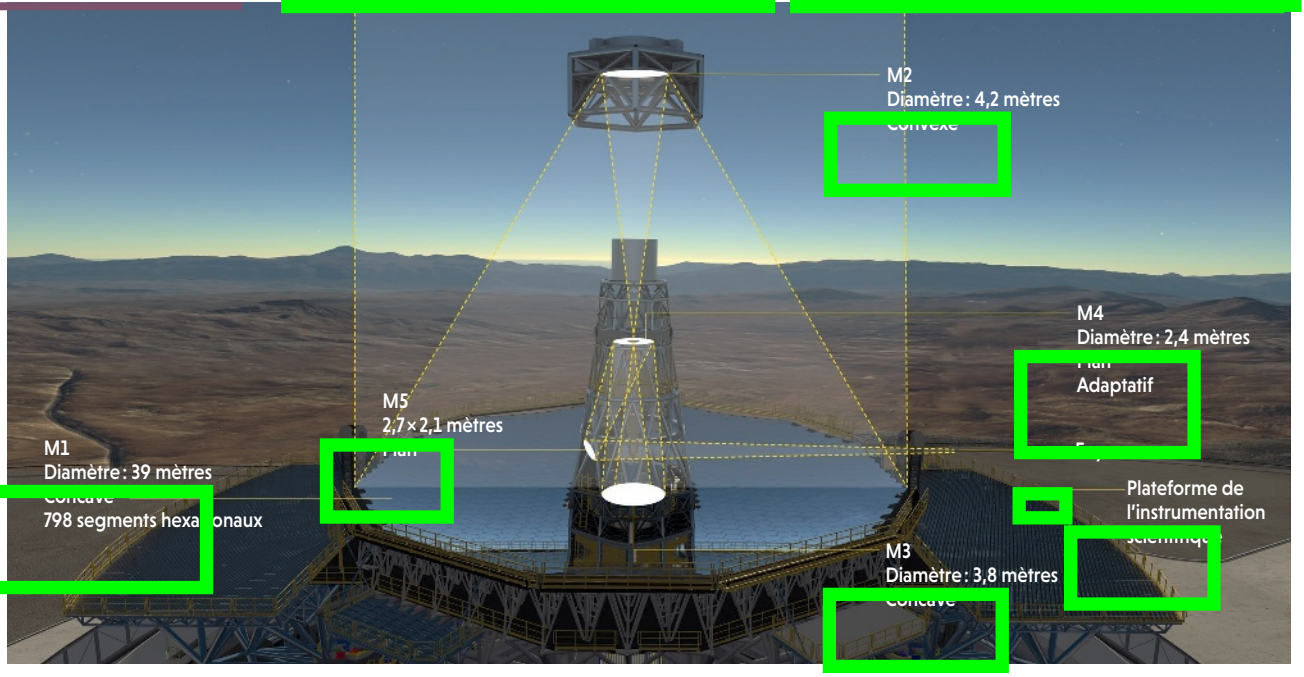
© ESO/Dorling Kindersley

Avec une telle taille de miroir, les coûts et les difficultés techniques explosent. Les plus grands télescopes en service actuellement se divisent en deux groupes selon que leur miroir est constitué d'une seule pièce, comme les quatre télescopes qui composent le *VLT* du mont Paranal, ou qu'il est segmenté, c'est-à-dire composé d'un assemblage de pièces plus petites. C'est le cas des deux télescopes de l'observatoire *Keck*, du *GTC* et ce sera aussi celui de l'*ELT*.

UN MIROIR SEGMENTÉ

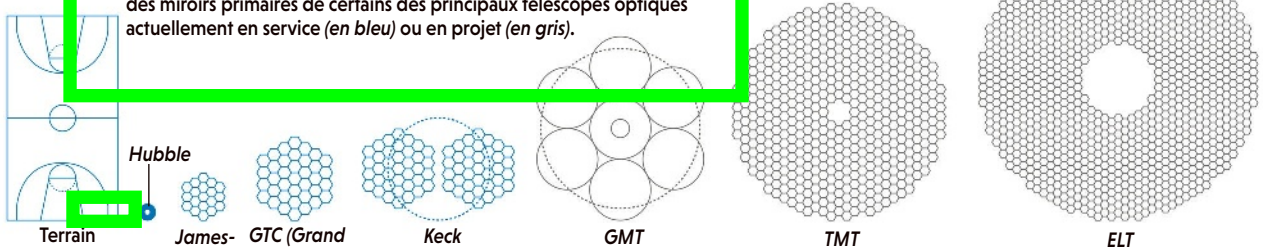
La raison de ce choix est simple : à partir d'une certaine taille, il est techniquement impossible de tailler et de polir un miroir d'un seul bloc. La solution est donc de fabriquer plusieurs pièces et de les assembler. Toutefois, pour qu'un miroir segmenté puisse remplir sa mission scientifique, en particulier en ce qui concerne la qualité de l'image, le véritable défi consiste à disposer et maintenir toutes les parties de façon que l'ensemble se comporte comme un miroir géant d'un seul tenant.

Dans le cas de l'*ELT*, le miroir primaire sera composé de 798 segments hexagonaux d'environ 1,4 mètre de diamètre entre 2 sommets opposés. Chacun sera équipé de 12 capteurs et 3 actionneurs ainsi que d'autres mécanismes de contrôle de sa position. Le tout fait du miroir primaire le système le plus complexe de l'observatoire. La tolérance maximale de décalage vertical entre deux segments adjacents est de quelques dizaines de nanomètres et les défauts de surface ne peuvent excéder 20 nanomètres, ce qui requiert un procédé de polissage extrêmement long et coûteux de 6 ans. Au-delà >



FORMATION DE L'IMAGE
L'*ELT* compte une succession de six miroirs qui guident les rayons lumineux *(zones ombrées)* jusqu'au foyer où ils forment une image. Ce schéma montre les cinq premiers miroirs (de M1 à M5). Le sixième (M6, *non représenté*) se trouve sur la plateforme d'instrumentation scientifique. Sa fonction est de diriger la lumière vers l'un des instruments qui y sont installés. Le télescope comprend deux plateformes de ce type, chacune équipée de son propre M6.

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE TÉLESCOPES
L'*ELT* sera le plus grand d'une nouvelle génération de télescopes géants destinés à révolutionner tous les domaines de l'astronomie. Ce schéma compare les tailles des miroirs primaires de certains des principaux télescopes optiques actuellement en service *(en bleu)* ou en projet *(en gris)*.



© ESO

LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE L'ELT

L'*ELT* étudiera avec une grande précision tous types d'objets aussi bien proches que lointains. Grâce à une instrumentation de pointe, ses objectifs scientifiques seront nombreux et concerneront aussi bien le Système solaire, l'atmosphère des exoplanètes et les disques protoplanétaires que les galaxies lointaines, les trous noirs ou la première génération d'étoiles de l'univers.

SYSTÈME SOLAIRE

Avec l'avalanche de missions spatiales destinées à étudier les objets du Système solaire *in situ*, on peut penser qu'un télescope situé sur Terre n'a pas grand-chose de nouveau à apporter. Toutefois, étant donné l'abondance et la diversité des corps, leur variabilité dans le temps et l'éloignement de certains d'entre eux, nombreux sont les aspects qui restent à explorer.

L'étude des corps primordiaux tels que les astéroïdes, les comètes ou les objets transneptuniens révélera de précieuses données sur le passé du Système solaire. Les satellites de certaines planètes sont le siège de phénomènes transitoires que l'*ELT* suivra en direct et caractérisera. Parmi eux : les nuages, lacs et océans de méthane de Titan (une lune de Saturne), l'activité volcanique d'Io (satellite de Jupiter) ou les geysers et panaches aqueux d'Europe (Jupiter) ou d'Encelade (Saturne) qui sont d'un grand intérêt pour l'astrobiologie.

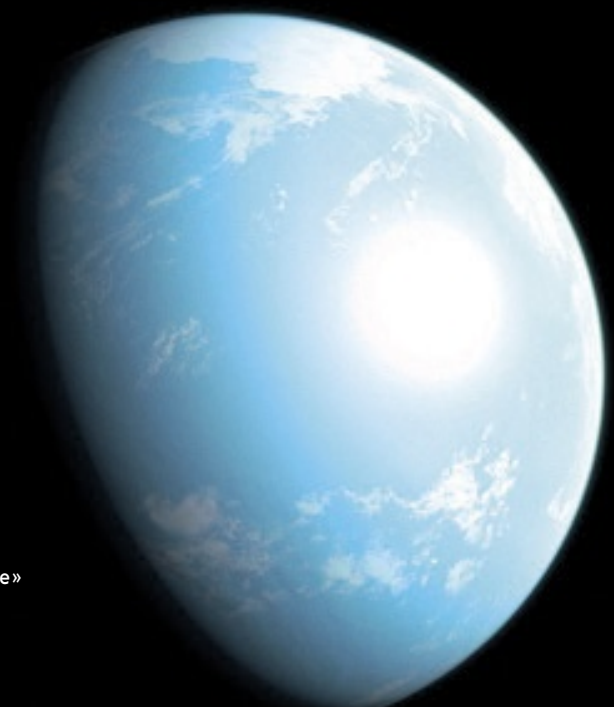
Par ailleurs, étant donné l'absence de missions spatiales vers Uranus ou Neptune avant au moins 2050, l'*ELT* étudiera en détail la météorologie, le climat, les vents et l'atmosphère de ces mondes lointains.

Saturne, photographiée par la sonde *Cassini* en 2010.

EXOPLANÈTES

Plus de 3 000 planètes en orbite autour d'autres étoiles ont été cataloguées depuis la découverte de la première, en 1995. Leur diversité est immense et nous connaissons certaines caractéristiques de leurs orbites ainsi que leurs masses et leurs tailles, ce qui permet parfois d'en déduire s'il s'agit de mondes rocheux, gazeux ou gelés. Cependant, on en sait très peu sur leurs caractéristiques physiques. On a déterminé la présence de certains composés chimiques ou de brumes d'altitude seulement pour certaines des plus grandes exoplanètes. L'*ELT* accédera aux propriétés physicochimiques des atmosphères de nombreuses exoplanètes. En fait, son objectif le plus ambitieux, et l'une des raisons qui ont motivé sa construction, sera la caractérisation des planètes semblables à la Terre, en particulier celles qui se trouvent dans la « zone habitable » de leur étoile hôte, la région où la présence d'eau liquide à la surface de la planète est possible.

À l'aide de techniques coronographiques (qui masquent la lumière de l'étoile pour mieux discerner celle reflétée par la planète), comme celles qui seront mises en œuvre par l'instrument *Metis*, l'*ELT* analysera les atmosphères d'exoplanètes et déterminera leur température à partir de la lumière réfléchie ou de leur rayonnement thermique propre. On pourra aussi rechercher des traces de vapeur d'eau, d'oxygène et d'autres gaz qui sont potentiellement des biomarqueurs, tels le méthane et l'oxyde nitreux, sur des planètes plus petites. La recherche de « signes de vie » sera l'un des principaux objectifs.



Vue d'artiste de l'exoplanète GJ 357 d, distante de 31 années-lumière.

Vue d'artiste du disque protoplanétaire de l'étoile HD 21997, distante de 235 années-lumière.

SYSTÈMES PLANÉTAIRES

La formation des systèmes planétaires constituera une autre voie de recherche pour l'*ELT*. L'observatoire *Alma*, dans le désert de l'Atacama, a déjà observé en détail la structure de disques protoplanétaires autour d'étoiles jeunes. Grâce à sa haute résolution aussi bien spectrale que spatiale, l'*ELT* analysera la façon dont la matière se regroupe dans ces disques pour former des planètes, déterminera ses mouvements ainsi que la distribution du gaz et de la poussière. Cela permettra de mieux comprendre comment se forment les systèmes planétaires autour des différents types d'étoiles.

GALAXIES ET TROUS NOIRS

Un autre grand objectif de l'*ELT* sera de démêler les mystères de la formation et de l'évolution des galaxies. Sa résolution spatiale élevée lui permettra d'étudier le trou noir central de la Voie lactée et celui d'autres galaxies proches. Il mesurera les mouvements des étoiles du centre galactique autour de lui, et déterminera comment croissent ces colosses et comment ils influent sur l'évolution des galaxies.
L'*ELT* étudiera aussi les parties plus extérieures des galaxies. La spectroscopie en infrarouge proche de l'instrument *Metis* permettra d'analyser des milliers d'étoiles au sein des amas globulaires, des « essaims » stellaires qui gravitent comme des satellites autour des grandes galaxies. On espère aussi pouvoir étudier la structure et l'évolution chimique des galaxies de l'amas de Virgo et de celui de Fornax, situés respectivement à 54 et 62 millions d'années-lumière.

La galaxie UGC1810, située à 300 millions d'années-lumière, photographiée par le télescope spatial *Hubble*.

L'UNIVERS LOINTAIN

Par spectroscopie à haute résolution, l'*ELT* analysera la lumière de supernovæ très lointaines, correspondant à des époques auxquelles l'Univers n'avait qu'entre 1 et 6 milliards d'années (l'âge actuel de l'Univers est estimé à environ 13,8 milliards d'années). Le télescope fournira des informations sur les galaxies de ces époques précoces, leur évolution chimique et les mécanismes de formation stellaire qui y opéraient. L'*ELT* devrait pouvoir remonter encore plus loin dans le temps. Capable de détecter des sources très faibles et lointaines, il devrait être en mesure d'observer l'époque où l'Univers avait entre 200 et 500 millions d'années, lorsqu'il s'est empli de la lumière des toutes premières étoiles, que l'hydrogène a été ionisé et que sont apparues les premières protogalaxies. Les meilleurs télescopes actuels ne peuvent qu'à grand-peine détecter les galaxies les plus lumineuses à des époques où l'Univers avait 500 millions d'années.

CL J10001, l'amas de galaxies le plus lointain que l'on connaisse. À cause de la distance qui nous en sépare, cette image le montre tel qu'il était lorsque l'Univers avait 2,7 milliards d'années, soit 20 % de son âge actuel.

L'ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION COSMIQUE

On sait depuis vingt-cinq ans que l'expansion de l'Univers accélère. Ce résultat inattendu vient de l'observation d'un type particulier de supernovæ dont la luminosité intrinsèque est connue et toujours la même, et donc, par conséquent, la distance est donnée directement par la mesure de l'éclat apparent, indépendamment de leur vitesse de fuite due à l'expansion cosmique. Cette découverte, fondée en partie sur des travaux effectués avec les télescopes de l'ESO, a valu en 2011 le prix Nobel à Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian Schmidt.
L'étude détaillée de ce phénomène est l'un des objectifs principaux de la cosmologie moderne. L'*ELT* mesurera avec une grande précision les vitesses de fuite de nombreuses galaxies lointaines. En comparant les données correspondant à différentes époques de l'histoire de l'Univers, il fournira une mesure directe de l'accélération de l'expansion cosmique.

Quelques-unes des galaxies les plus lointaines et les plus anciennes que l'on connaisse, photographiées par le télescope spatial *Hubble*.

PHYSIQUE FONDAMENTALE

Pour finir, l'*ELT* devrait fournir des pistes pour répondre à certaines questions ouvertes en physique fondamentale. L'une d'elles est de savoir si la constante dite « de structure fine » (paramètre qui caractérise l'intensité de la force électromagnétique entre les particules élémentaires) ou le rapport entre les masses du proton et de l'électron sont restés toujours les mêmes depuis la naissance de l'Univers ou si, au contraire, ils ont varié au cours de l'histoire cosmique. L'analyse du rayonnement des quasars très lointains fournira des mesures de la constante de structure fine avec une précision de 1 partie pour 10 millions et indiquera si cette valeur dépend de la distance de la source, c'est-à-dire de l'âge de l'Univers au moment où la lumière a été émise.

Le quasar 3C273. Sa lumière a mis 2,5 milliards d'années à nous parvenir.

Nasa, ESA, Hubble, Hla, processing & copyright : Domino Pestana (UGC 1810) ; En rayons X : Nasa/CXC/CEA/T. Wang et al., en infrarouge et ultraviolet : ESO, en radio : ESO/NAOJ/NRAO/ALMA (CJ 1001) ; ESA/Nasa (Galaxies distantes) ; ESA/Nasa (Quasar 3C273)

> du miroir primaire, les autres miroirs ont des contraintes de polissage comparables et, bien qu'ils soient d'un seul tenant, leur fabrication reste difficile.

Malgré tout, le plus grand défi technique de l'*ELT* sera de maintenir les six miroirs dans les bonnes formes et les bonnes positions respectives pour compenser les perturbations, qu'elles soient d'origine externe ou interne. Le problème se pose pour tous les télescopes, mais il devient particulièrement compliqué dans le cas des télescopes géants. Les perturbations extérieures peuvent être induites par la pesanteur, par le vent ou par les changements de température au cours de la nuit. De leur côté, les perturbations internes peuvent provenir des écarts thermiques entre les différentes parties de la machine ou des vibrations de la structure.

COMPENSER LES PERTURBATIONS

Pour apprécier les subtilités et la complexité de ces effets, il faut comprendre comment se meut un télescope. L'engin pointe un objet dans le ciel un peu à la manière d'un canon: ce qu'on nomme la «monture azimutale» pivote autour d'un axe vertical, tandis que la «monture d'altitude» le fait autour d'un axe horizontal. Ces mouvements sont susceptibles d'être exécutés rapidement et s'achèvent en quelques minutes. Cependant, une fois que l'objet est visé, il faut compenser l'effet de la rotation de la Terre pendant toute la durée de l'observation (typiquement de l'ordre de quelques minutes à quelques heures).

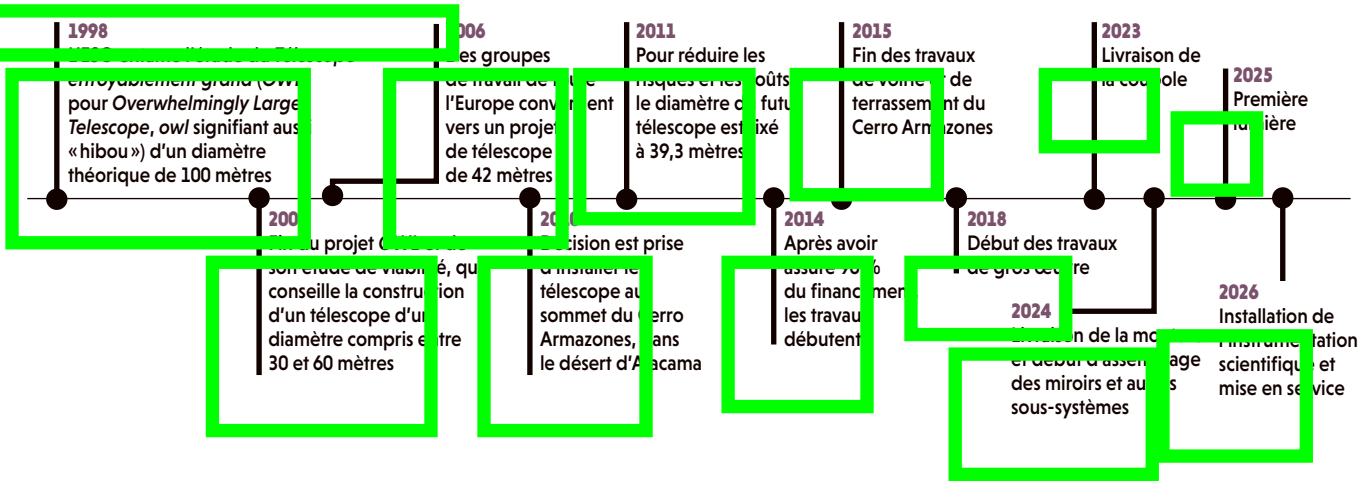
La structure est alors soumise à des déformations dues à son propre poids et dont l'intensité dépend de l'orientation du télescope par rapport à la verticale. C'est particulièrement le cas de la monture d'altitude qui, tout en pesant 2000 tonnes, voit son orientation verticale modifiée de façon significative à mesure que le télescope travaille. Toutes ces déformations structurelles déplacent les miroirs par rapport à leurs positions nominales. Il faut y ajouter les déformations que les miroirs eux-mêmes subissent, là encore sous l'effet de leur propre poids. Si on ne les compensait pas, ces deux effets engendreraient des erreurs de pointage et des distorsions de l'image dans le plan focal.

Par ailleurs, les variations de température tout au long de la nuit, de même que les écarts de température entre les différentes parties du télescope, induisent des dilatations et des contractions de la structure et des miroirs, ce qui, tout comme les effets de la pesanteur, engendre des erreurs de pointage et dégrade l'image. Il en va de même des perturbations dues au vent. Ce problème touche la majorité des observatoires, car ils sont généralement installés sur des sites où la qualité de l'atmosphère est excellente, mais où le vent souffle souvent assez fort.

Pour finir, il faut ajouter à tout cela les vibrations provoquées par le fonctionnement même de la structure de support: de nombreux équipements tels que les réfrigérateurs à eau ou les pompes à huile des coussinets hydrostatiques soutenant les axes du télescope, engendrent des vibrations de haute fréquence et, par conséquent, des mouvements des miroirs de faible amplitude mais très rapides.

Fort heureusement, hormis les vibrations internes, toutes les perturbations mentionnées peuvent être ramenées à des niveaux acceptables. Le télescope dispose à cette fin d'actionneurs capables de modifier aussi bien la forme que la position des miroirs. Ces actionneurs sont asservis à une série de caméras qui produisent en permanence des images de certains objets célestes de référence, ce qui permet de les comparer et de compenser les déformations en temps réel. Les vibrations de la structure, en revanche, se succèdent si rapidement qu'elles sont très difficiles à compenser. La bonne stratégie consiste donc à les combattre dès l'origine, à faire en sorte qu'elles n'aient pas lieu ou tout au moins à les amortir à l'aide de systèmes antivibrations.

CHRONOLOGIE DE L'ELT



Le quatrième miroir, déformable, comporte 5300 actionneurs

En plus des perturbations que nous venons de décrire, l'atmosphère ajoute d'autres effets non désirés. Les turbulences et la répartition irrégulière de la température provoquent des modifications locales de l'indice de réfraction: les rayons lumineux provenant d'objets lointains sont alors légèrement déviés, de quoi déformer l'image qui se forme dans le télescope. C'est principalement pour éviter cet effet qu'on met en orbite dans l'espace des télescopes, comme *Hubble* ou le futur télescope *James-Webb* de la Nasa, de l'Esa et de l'Agence spatiale canadienne.

Là encore, cet effet, qui rendrait inutile l'effort de construire un télescope géant, du moins en ce qui concerne le pouvoir de résolution, peut être compensé. La solution se trouve du côté des techniques dites «d'optique adaptative»: il s'agit essentiellement d'utiliser des miroirs dont la surface est déformable de façon à contrebalancer les distorsions dues à l'atmosphère. Bien que ces techniques existent déjà et soient mûres pour leur application à un miroir de 39,3 mètres constitue un défi hors de portée. Ainsi, dans l'*ELT*, c'est le quatrième miroir qui est déformable. Il comporte 5300 actionneurs et mesure 2,4 mètres de diamètre pour seulement 2 millimètres d'épaisseur. Ce miroir est l'un des éléments les plus cruciaux et délicats de l'*ELT*.

DES LASERS DANS LE CIEL

L'origine de ces techniques d'optique adaptative remonte au milieu du XXe siècle, mais elles n'ont été appliquées à l'astronomie qu'à partir des années 1990 avec l'augmentation de la puissance de calcul informatique. On les applique désormais aussi en ophtalmologie et, plus récemment, en imagerie cellulaire. Différents observatoires ont développé ces techniques, parmi lesquels l'ESO. L'un des télescopes de 8,2 mètres qui composent le *VLT* est équipé d'un miroir déformable pour de l'optique adaptative. Toutefois, jusqu'à il y a peu, cette technique n'était utilisable que pour étudier certaines régions précises du ciel: celles qui contenaient une étoile assez brillante pour servir de référence. Cette limitation a été dépassée grâce au développement des «étoiles laser».

De quoi s'agit-il? Pour que les techniques d'optique adaptative fonctionnent, il faut en permanence prendre des images d'objets de référence, les analyser et engendrer ainsi les commandes à envoyer aux actionneurs pour déformer les miroirs et corriger l'image. Puisque l'atmosphère évolue très vite, le système de contrôle doit être lui aussi très rapide. Mais pour cela, il faut que les étoiles de référence soient suffisamment brillantes, ce que l'on ne trouve hélas pas dans la plupart des régions du ciel. Pour résoudre le problème, on crée des étoiles artificielles en tirant divers faisceaux laser. Ces derniers excitent la couche de sodium gazeux se trouvant à 80 kilomètres d'altitude dans la mésosphère, ce qui produit des points lumineux dont l'éclat équivaut à celui d'une étoile naturelle.

L'*ELT* devrait être équipé de huit lasers de ce type afin de produire autant d'étoiles artificielles. Ces lasers de grande puissance ont été développés et brevetés par l'ESO. Avec l'aide de partenaires industriels, l'ESO a optimisé leur production pour les adapter aux besoins spécifiques de l'*ELT*.

DÉFIS ET RÉCOMPENSES

La construction de l'*ELT*, bien qu'elle ait son lot de problèmes inhérents à des projets de cette envergure, se déroule jusqu'ici comme prévu. En ce qui concerne les différentes parties du télescope, les principales difficultés se concentrent en ce moment autour du miroir primaire et du quatrième miroir, celui de l'optique adaptative. Du point de vue global, la principale difficulté sera le maintien des miroirs dans les bonnes positions et les bonnes formes à chaque instant. C'est là une exigence essentielle pour obtenir une image au plan focal libre de toute aberration. Sans cela, tout l'intérêt d'avoir un télescope géant sera perdu.

Que nous réserve le plus grand œil de la planète? Les premières découvertes dépendront dans une large mesure de l'ordre selon lequel les différents instruments, qui ont chacun des qualités spécifiques, arriveront à l'observatoire. Peut-être concerneront-elles les galaxies, les planètes ou les trous noirs. Toutefois, celui qui aurait le plus d'impact, bien que la perspective en soit plus éloignée dans le temps, serait l'obtenir l'image d'une planète semblable à la Terre en orbite autour d'une étoile de type solaire.

L'*ELT* est une machine extrêmement complexe qui, tout en pesant plus de 3600 tonnes et en étant aussi haute qu'une cathédrale, devra viser des objets stellaires avec une précision de quelques millièmes de degré et fournir des images d'une qualité exceptionnelle à différents instruments scientifiques. Ces derniers sont eux-mêmes des machines gigantesques dont la conception est techniquement très délicate. Le gant est relevé. ■

BIBLIOGRAPHIE

programme, *Advances in Optical Astronomical Instrumentation 2019*, article 1120303, 2020.

The science case for the European Extremely Large Telescope : The next step in mankind's quest for the universe, ESO, septembre 2010 www.eso.org/public/products/books/book_0003

The E-ELT construction proposal, ESO, décembre 2011 : www.eso.org/public/products/books/book_0046

Programme de construction de télescopes géants aux États-Unis : www.noao.edu/us-elt/program/overview.php

Ces panicules de diverses variétés de riz sont conservées et étiquetées après la récolte au conservatoire Basudha, fondé en Inde par l'auteur.

© Zoé Savitz

L'ESSENTIEL

- Dans les années 1960, l'Inde possédait 110 000 riz indigènes aux caractéristiques diverses, mais 90 % ont disparu des cultures aujourd'hui.
- Seules quelques variétés à haut rendement poussent dans les champs, nécessitant des intrants et ayant de médiocres performances dès que les conditions environnementales sont défavorables.
- Cependant, Vrihi, un réseau de banques de semences, régénère et documente les riz traditionnels afin de les rendre aux paysans indiens.

L'AUTEUR

DEBAL DEB
fondateur de la ferme Basudha et de la banque de semences de riz Vrihi, en Inde

Sauver les riz traditionnels indiens

En Inde, certaines variétés indigènes de riz résistent aux inondations, aux sécheresses et à maintes autres catastrophes. Reste à en relancer la culture...

Un jour de l'été 1991, après avoir passé des heures à étudier la biodiversité des bois sacrés du sud du Bengale-Occidental (État de l'est de l'Inde) dans la chaleur brûlante, je me suis dirigé vers la hutte de Raghu Murmu, un jeune homme du peuple des Santals. Raghu m'a accueilli à l'ombre d'un énorme manguier, pendant que sa fille allait chercher de l'eau fraîche et des sucreries à base de riz. Tandis que je les savourais, j'ai remarqué que l'épouse de Raghu, enceinte, buvait un liquide rougeâtre. Mon hôte m'expliqua qu'il s'agissait d'amidon obtenu en cuisant du bhutmuri, un riz que l'on nomme aussi « tête de fantôme », peut-être à cause de son enveloppe sombre... Cet amidon « restaure le sang des femmes qui n'en ont pas assez pendant la grossesse et après l'accouchement », précisa Raghu. J'en déduis que l'amidon de bhutmuri était censé guérir l'anémie des femmes enceintes et en *post partum*. Une autre variété de riz, le paramai-sal – le « riz de longévité » – favorise pour sa part la croissance des enfants, me signala aussi Raghu.

Plus tard, j'ai établi que le bhutmuri faisait partie des quelques variétés indigènes de riz d'Asie du Sud riches en fer et en certaines vitamines B. Le paramai-sal est pour sa part riche en antioxydants, en micronutriments et en amidon digeste, que le corps convertit facilement en énergie. Au moment de ma rencontre avec Raghu, ces variétés rares de riz étaient des nouveautés pour moi, comme l'étaient leurs noms évocateurs et leurs usages médicinaux traditionnels. Une fois rentré chez moi à Calcutta, j'ai réalisé une recherche bibliographique sur la diversité génétique du riz indien, et compris la chance que j'avais eue de rencontrer Raghu. Les petits riziculteurs comme lui, cultivant et appréciant la valeur des riz indigènes, sont en effet aussi menacés que les variétés de riz elles-mêmes.

Au cours des années qui ont suivi, je me suis familiarisé avec les nombreuses variétés indigènes indiennes. Leurs propriétés sont étonnamment diverses et utiles : certaines résistent aux inondations, à la sécheresse, à la salinité ou aux attaques de parasites ; d'autres sont riches en vitamines ou en >

> minéraux précieux; d'autres encore ont des couleurs, des goûts ou des arômes plaisants qui expliquent leur rôle dans les cérémonies religieuses traditionnelles. En fait, collecter, régénérer, puis partager avec les riziculteurs ces variétés rares, mais précieuses, est devenu la mission de ma vie !

Oryza sativa, riz cultivé en Asie, est le résultat de siècles de sélection d'espèces sauvages de riz pendant le Néolithique, processus que Charles Darwin nommait « sélection artificielle ». Des indices archéologiques et génétiques suggèrent que la sous-espèce *Oryza sativa indica*, qui constitue la presque totalité du riz cultivé sur le sous-continent indien, était déjà cultivée sur les contreforts de l'Himalaya oriental il y a de 7000 à 9000 ans. Au cours de millénaires de domestication et de culture qui ont suivi, les riziculteurs ont créé tout un spectre de riz adaptés à divers sols, topographies et microclimats et répondant à des besoins culturels, nutritionnels ou médicinaux spécifiques.

UN TRÉSOR PERDU DE BIODIVERSITÉ

Selon l'expert indien du riz Radhey Richharia, les paysans indiens cultivaient plus de 140000 variétés de riz jusque dans les années 1970. Si l'on tient toutefois compte des synonymes – c'est-à-dire des variétés ayant plusieurs noms régionaux –, ce chiffre se réduit à 110000 variétés distinctes environ. Cependant, comme je l'ai constaté en menant mon enquête bibliographique, la biodiversité du riz indien a énormément diminué depuis la Révolution verte.

De quoi s'agit-il ? À la fin des années 1960, l'Institut international de recherche sur le riz – ou Irri pour *International rice research institute* –, une organisation non gouvernementale (ONG) basée aux Philippines, a fourni au gouvernement indien plusieurs variétés de riz à haut rendement. De fait, ces variétés de riz produisent des quantités substantielles de grains, à condition de leur fournir assez d'eau, d'engrais et de pesticides. De concert avec les agences internationales de développement, l'Irri a encouragé le remplacement dans les champs indiens des variétés indigènes par ces souches importées. Parfois imposés, toujours largement promus, les nouveaux riz ont vite largement supplanté les riz traditionnels.

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, les chercheurs de l'Irri ont recensé au Bengale-Occidental 5556 variétés indigènes et en ont recueilli 3500 afin de constituer une banque de gènes. En 1994, ne trouvant aucune documentation sur les variétés indigènes survivantes dans l'État, j'ai lancé ma propre enquête. Achevée en 2006, elle montre que 90 % des variétés indigènes documentées ne sont plus cultivées. Il est en fait vraisemblable que pas plus de 6000 variétés de riz subsistent dans les champs indiens. La situation est similaire au Bangladesh : entre 1979 et 1981, l'institut de recherche sur le riz de ce pays a répertorié 12479 variétés, mais selon une étude récente, pas plus de 720 variétés indigènes sont encore cultivées dans le delta du Gange.

Lorsque j'ai commencé à mesurer l'étendue de cette stupéfiante perte de biodiversité sur le sous-continent indien, j'ai été choqué en tant que biologiste et en tant que citoyen engagé. Je me suis demandé pourquoi les institutions agricoles ne s'inquiétaient pas de l'érosion génétique de la plus importante céréale de la région. Depuis la Grande Famine d'Irlande des années 1845 à 1849, le désastre que peut entraîner une trop grande baisse de la diversité génétique d'une culture devrait pourtant être clair !

L'Irish Lumper, la variété de pomme de terre la plus cultivée en Irlande au XIXe siècle, était peu résistante au mildiou (*Phytophthora infestans*). En 1846, ce microorganisme anéantit les trois quarts de la récolte, ce qui entraîna une pénurie de nourriture et de semences pendant plusieurs années. La famine tua alors au moins un million d'Irlandais et en poussa au moins un autre million à l'immigration vers l'Australie et l'Amérique du Nord. La leçon de cet épisode est que l'absence de diversité culturale rend une espèce vulnérable aux parasites

Une paysanne indienne transplante des pousses de riz dans l'une des rizières de la ferme Basudha.

et aux maladies ; en d'autres termes, les monocultures sont désastreuses à long terme pour la sécurité alimentaire. De fait, dans le sillage de la Révolution verte, le charançon du riz (*Dicladispa armigera*) et la cicadelle brune (*Nilaparvata lugens*), qui n'avaient jamais posé de grave problème, ont dévasté les rizières de plusieurs pays.

Aujourd'hui, des monocultures étendues sur de vastes espaces sont autant de banquets pour certains parasites. Les riziculteurs arrosent leurs champs de pesticides pour tenter de les éliminer, ce qui aboutit à tuer les ennemis naturels de ces parasites… Le résultat net est une augmentation de la diversité et de l'abondance des parasites, ce qui fait rouler les épandeuses de pesticides. L'uniformité génétique – en particulier celle des variétés sélectionnées pour leur rendement élevé et mises en culture au cours de la Révolution verte – signifie aussi que les plantes manquent de ressources pour résister aux conditions difficiles, comme les pluies insuffisantes ou tardives, les inondations saisonnières, ou encore les tempêtes qui inondent les champs côtiers d'eau salée. Cette fragilité des cultures rend les riziculteurs pauvres plus vulnérables aux fluctuations environnementales, par exemple quand ils n'ont pas les moyens de s'acheter une pompe d'irrigation…

La disparition des variétés indigènes entraîne en outre le dépérissement de tout le savoir associé à leur culture. Les riziculteurs traditionnels savent par exemple distinguer les variétés en observant leur période de floraison, la couleur de la gaine foliaire (partie de la feuille embrassant la tige de la plante), l'angle de la feuille paniculaire (la dernière feuille qui sous-tend l'inflorescence), la longueur de la panicule (l'inflorescence), ainsi que la taille, la couleur et la forme du grain (*voir l'encadré page 47*). Ils se servent de ces traits et d'autres pour repérer et éliminer toutes les plantes «hors-type» (se distinguant par un ou plusieurs caractères) afin de maintenir la pureté génétique de la variété. Aujourd'hui, cependant, la plupart des riziculteurs d'Asie du Sud ont un fournisseur de semences, ce qui évite d'avoir à maintenir la pureté de ses propres variétés. Lorsqu'une variété locale n'est plus disponible, la connaissance liée à ses utilisations agronomiques et culturelles s'efface de la mémoire collective. Dès lors, des stratégies millénaires de mise à profit de la biodiversité dans la lutte contre les parasites et les maladies sont supplantées par les conseils des marchands de pesticides, non sans conséquences pour la biodiversité, la qualité des sols et de l'eau, et la santé humaine.

La Révolution verte et, plus largement, la modernisation de l'agriculture ont aussi eu des conséquences sociales et économiques graves. L'augmentation du coût des intrants (semences, engrais, pesticides, …) et du carburant pour pompes d'irrigation oblige les riziculteurs indiens à emprunter, souvent à des prêteurs privés. Combiné avec la chute des prix agricoles, l'endettement qui en résulte a provoqué de nombreuses ventes précipitées de terres et une épidémie de suicides parmi les paysans. Au contraire, durant mes décennies de travail avec des cultivateurs aborigènes continuant à planter des riz et des millets indigènes dans leurs exploitations marginales, je n'ai été confronté à aucun cas de suicide.

En 1996, ayant déjà 152 variétés de riz dans ma collection, je me suis tourné vers la station de recherche sur le riz de la direction de l'agriculture du Bengale-Occidental, où tout le matériel génétique des riz traditionnels indiens est censé être conservé. Non seulement la station a refusé d'accueillir et de conserver les semences que j'avais collectées, mais le directeur m'a reproché de poursuivre l'objectif «ascientifique et rétrograde» de faire revivre les variétés oubliées. Insister pour les cultiver signifierait «revenir à l'âge de l'homme des cavernes» et condamner les riziculteurs à une faible productivité et à une pauvreté permanente, selon lui. Lorsque j'ai rappelé qu'aucune des variétés à haut rendement ne peut survivre dans les champs arides sans irrigation, dans les champs de riz submergés ou dans les fermes en sols salins, il m'a assuré que l'ingénierie génétique aboutirait bientôt aux meilleures variétés pour ce type marginal d'exploitation, de sorte que je devrais plutôt laisser les agronomes experts s'occuper de cette question.

UNE BANQUE DE SEMENCES DE RIZ INDIGÈNE

Écologue de formation, je m'étais spécialisé dans les structures et les fonctions des écosystèmes, et je travaillais alors au bureau régional oriental de la branche indienne du Fonds mondial pour la nature (WWF). À l'époque, cette ONG et d'autres œuvraient surtout à la conservation des animaux emblématiques comme le tigre. Les céréales cultivées ne faisant pas partie de la «faune sauvage», on ne s'intéressait pas à leur protection. Les organismes de recherche ne s'en inquiétaient pas non plus, car aucune subvention n'était prévue pour aider à la conservation de variétés de plantes cultivées.

La seule option qui me restait était de faire cavalier seul. En 1996, j'ai donc démissionné de mon travail et créé dans un village du Bengale-Occidental une banque de semences de riz indigène qui est aussi un centre d'échange pour riziculteurs. En 1997, je l'ai nommée Vrihi, ce qui signifie en sanskrit «diffusion du riz». Pendant les premières années, j'ai financé cette activité à l'aide de mes économies et du soutien considérable de Navdanya, une ONG basée à New Delhi dédiée à la protection de la >

© Zoë Schlanger/Atlantic Monthly Group/Getty Images

> biodiversité et au développement de l'agriculture biologique: Navdanya collecte en particulier les semences rares de tout le pays afin de les distribuer gratuitement aux riziculteurs dans le besoin. Depuis 2000, cependant, ces dons d'amis et de sympathisants constituent l'essentiel de notre financement.

En 1999, le département des forêts m'a envoyé étudier la biodiversité du nord du Bengale-Occidental et j'en ai profité pour explorer les champs de la région. Un jour, après six heures de voyage en bus et à pied vers le village isolé de Lataguri, je suis tombé sur l'agni-sal. Cette variété de riz est en danger critique d'extinction, c'est-à-dire, selon ma définition de cette notion, qu'elle n'est plus cultivée que dans une unique exploitation. Le grain de ce riz était de couleur rouge feu – d'où son nom *agni*, signifiant «feu» – et sa tige assez solide pour résister aux tempêtes. La saison suivante, j'en ai donné des semences à un riziculteur cherchant un riz capable de pousser dans sa ferme des hauts plateaux, balayée par des vents violents. Il est revenu l'année d'après, avec un sourire de gratitude pour la bonne récolte obtenue malgré un cyclone ayant dévasté les exploitations de ses voisins. Un fonctionnaire du département de l'agriculture du district l'a cependant persuadé l'année suivante de remplacer l'agni-sal par un riz à haut rendement, ce qui a fait disparaître ce riz de notre réseau. Je me suis donc précipité à Lataguri à la recherche d'un autre échantillon. Hélas, mon donneur initial était mort l'année précédente et son fils avait abandonné ce riz. À ma connaissance, l'agni-sal a disparu aujourd'hui.

LE POUVOIR DES SNORKEL

À la même époque, un autre incident m'a persuadé qu'il fallait faire plus que collecter et redistribuer les semences anciennes. Les riziculteurs traditionnels des basses terres indiennes cultivaient deux types de riz résistant aux inondations. L'un d'eux acquiert une tige de plus en plus grande au fur et à mesure de l'élévation du niveau de l'eau. Régie notamment par les gènes *Snorkel 1* et *Snorkel 2*, situés sur le chromosome 12, cette capacité d'«allongation de la tige» sous l'eau est aussi présente dans les variétés traditionnelles lakshmi dighal, jabrah, pantara et rani kajal. L'autre type résiste à une immersion prolongée dans les eaux de crue. L'un des gènes régissant la tolérance à la submersion est *Sub1*, présent dans plusieurs variétés indigènes bengalis.

En juin 1999, dans un district du sud du Bengale-Occidental, une crue soudaine a détruit toutes les récoltes de riz. Ma banque de semences ne disposait d'aucune variété tolérant la submersion, mais je savais que l'Irri et le Bureau indien des ressources phytogénétiques, à New Delhi, en possédaient plusieurs dizaines. J'ai donc écrit aux deux institutions, leur demandant de m'envoyer 10 à 20 grammes de ces semences afin de me permettre d'aider les riziculteurs en détresse, mais je n'ai même pas reçu un accusé de réception de l'une ou l'autre. Et de fait, à ma connaissance, aucun riziculteur, dans aucun pays, n'a jamais obtenu de semences auprès de ces nobles banques de gènes, même si elles ont constitué leurs collections à partir des contributions des paysans.

En revanche, les banques de gènes mettent leurs collections à la disposition des semenciers pour leurs programmes d'hybridation et de prises de brevet. Une estimation de l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires indique qu'en 1996, environ trois quarts des rizières américaines ont été ensemencées avec du matériel provenant des collections de l'Irri. Et en 1997, l'Office américain des brevets et des marques a accordé à la société texane RiceTec le brevet d'une portée la plus grande jamais accordée sur un riz indigène. Il s'agit d'une souche de basmati, obtenue à partir de parents issus de la collection de l'Irri

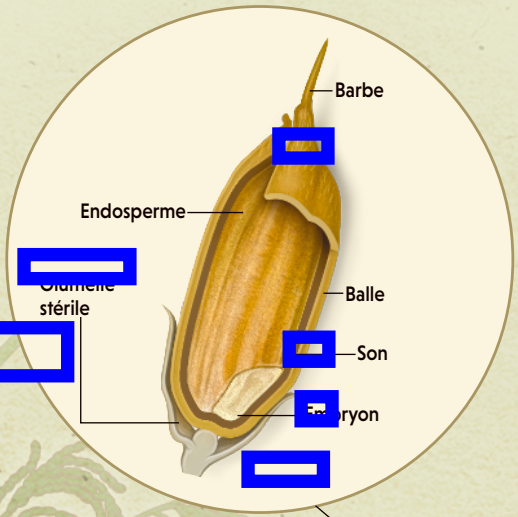
La tige d'un riz résistant aux inondations s'allonge avec l'élévation du niveau de l'eau

et originaires d'Asie du Sud. L'Irri, qui est censé mettre sa collection à disposition des riziculteurs du monde entier, a lui-même déposé en 2014 une demande de brevet international sur le gène *Spike*, découvert dans la variété indonésienne de riz daringan. Le secrétariat du Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (Tirpaa) examinait la légitimité de breveter un tel gène quand l'Irri a abandonné son projet de breveter *Spike*, qui s'était entretemps révélé peu intéressant.

Les grandes banques de semences ont le désavantage d'être géographiquement mais aussi socialement loin des riziculteurs, mais à ne s'arrêtent pas leurs inconvénients: le long isolement de leurs semences diminue leur valeur. Ces dernières sont en effet séchées et placées à - 20 °C, ce qui permet de les conserver jusqu'à trente-cinq ans. Figées dans le temps, elles sont >

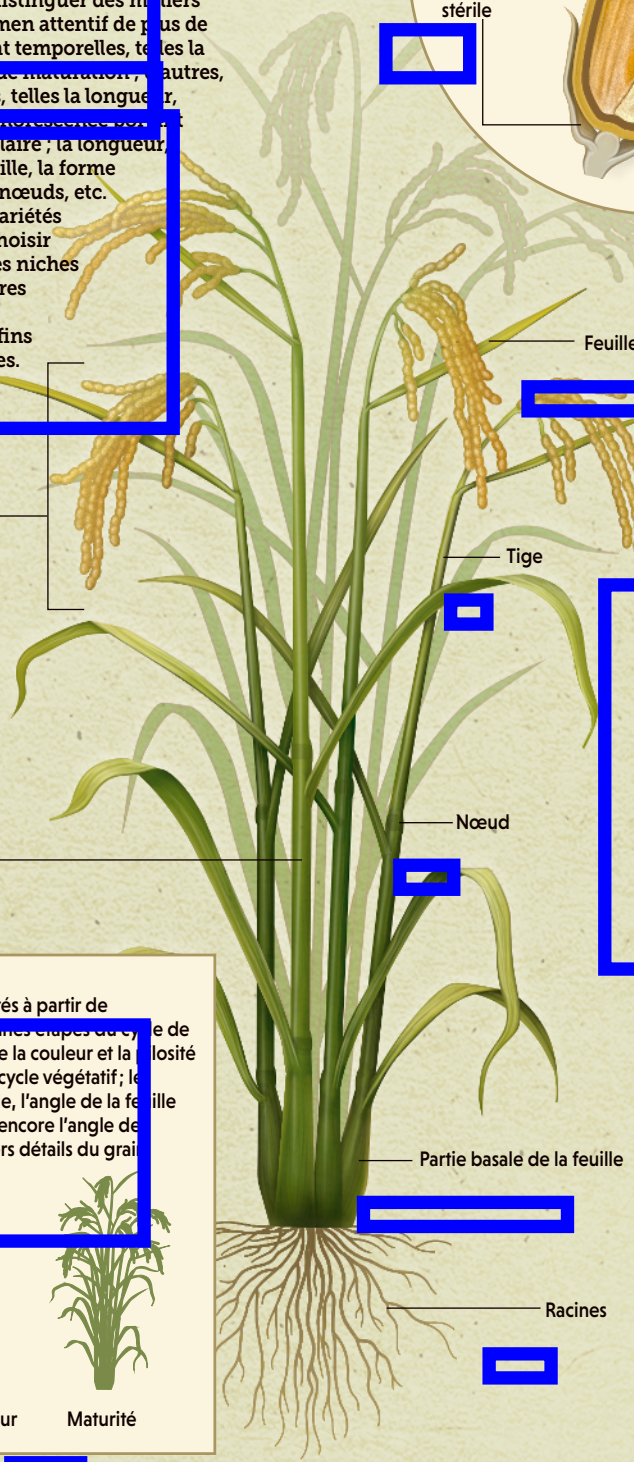
LE TRÉSOR DES VARIÉTÉS DE RIZ

Les paysans d'Asie du Sud savent distinguer des milliers de variétés de riz à partir de l'examen attentif de plus de 50 caractéristiques. Certaines sont temporelles, telles la date de floraison ou encore la période de maturation ; d'autres, tout aussi importantes, sont physiques, telles la longueur, la forme et la couleur de la balle (ou glumelle) et de la glumelle stérile (ou les épillets) ; l'angle de la feuille paniculaire ; la longueur, l'épaisseur et la couleur de la tige ; la taille, la forme et la couleur des grains, la couleur des nœuds, etc. Ce savoir-faire, aussi menacé que les variétés elles-mêmes, permet aux paysans de choisir les bonnes variétés à employer dans des niches écologiques différentes, comme les terres arides pentues, les plaines inondables, ou celles qu'il convient d'utiliser à des fins nutritionnelles, culturelles ou médicales.



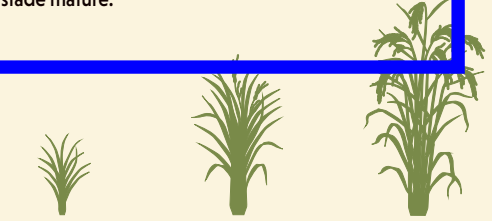
Les grains de riz varient dans la longueur de leurs barbes, la taille, la couleur, la forme et les arômes de leur endosperme, et bien d'autres caractéristiques. Dans certaines variétés rares, une même balle de riz contient deux ou trois grains. Les paysans traditionnels préfèrent souvent les variétés à barbes longues et pointues, car elles découragent la pâture par le bétail. Ils cultivent aussi certaines variétés particulièrement aromatiques, employées lors de certaines festivités.

Les variétés résistantes aux inondations tolèrent jusqu'à deux semaines de submersion ou allongent leurs tiges en fonction de la montée des eaux, ce qui maintient leurs panicules au sec. Des gènes spécifiques régissent ces propriétés, comme *Sub1* (submersion), *Snorkel 1* et *Snorkel 2* (élongation de la tige).



STADES DE DÉVELOPPEMENT

Les riziculteurs distinguent aussi les variétés à partir de caractéristiques n'apparaissant qu'à certaines étapes du cycle de vie des plantes. Ils observent par exemple la couleur et la pilosité de la feuille pendant le dernier stade du cycle végétatif ; le moment exact de formation de la panicule, l'angle de la feuille paniculaire pendant la reproduction ; ou encore l'angle de la panicule, la couleur de la barbe et divers détails du grain au stade mature.



© Rebecca Konte

> donc séparées des formes de vie en constante évolution du monde extérieur. Lorsqu'au bout de trente-cinq ans, on les remettra en culture, elles auront perdu toute résistance à certains agents pathogènes, dont les souches se sont renouvelées. Au contraire, les banques de semences locales, approvisionnées par les fermiers locaux et qui n'ont pas les moyens de conserver les semences au froid, doivent semer leur riz chaque année, sinon leurs grains, pas assez frais, seraient pour la plus grande partie incapables de germer. Grâce à cet impératif, leurs semences continuent à coévoluer avec les agents pathogènes et autres nuisibles.

SOIXANTE-QUATRE PLANTS CULTIVÉS PAR VARIÉTÉ DE RIZ

Après toute une série d'expériences et de constatations de ce type, j'ai décidé de créer ma propre ferme de conservation pour maintenir une petite population de chaque variété indigène afin qu'elle survive même en cas d'abandon par la plupart des riziculteurs. En 2005, j'ai investi les économies que j'avais faites sur une bourse de recherche postdoctorale à l'université de Californie, à Berkeley, afin de fonder la ferme Basudha. Vrihi est aujourd'hui la plus grande banque de gènes de riz en libre accès d'Asie du Sud, et ses 1420 variétés sont cultivées chaque année dans la ferme Basudha, dans un village aborigène du sud d'Odisha. Pas moins de 182 variétés de notre collection ont aujourd'hui disparu des champs indiens.

Comme nous avons moins de 0,7 hectare à notre disposition, nous cultivons 64 plants de chaque variété sur seulement quatre mètres carrés de terrain (d'après notre expérience, le nombre minimum de plants nécessaires pour maintenir tous les traits d'une variété donnée est d'environ 50). Comme nous ne pouvons pas respecter la distance d'isolement recommandée au niveau international (au moins 110 mètres entre cultures), empêcher la pollinisation croisée entre variétés voisines est un défi. Je pense l'avoir surmonté en plantant les différentes variétés de telle façon que chacune d'elles est entourée seulement par des variétés à dates de floraison différentes. Nous éliminons les plants hors-type de chaque population à différents stades de vie en suivant 56 caractéristiques différentes, conformément aux directives de l'ONG Bioversity International, basée à Rome. Une fois ce tri effectué, à l'exception de quelques mutations non détectées, toutes les graines récoltées sont supposées génétiquement pures à 100%.

À la ferme Basudha, toutes les variétés sont cultivées selon le principe agroécologique « zéro intrant », donc sans produits agrochimiques, sans eau d'irrigation pompée dans le sol et sans aucun usage de combustibles fossiles. L'apport en nutriments provient de paillis de feuilles et de paille (couche de matériau protecteur posée sur le sol) ou de cultures de couverture de légumineuses (dont les racines sont riches en microbes fixateurs d'azote), de légumes verts compostés et de fumier animal, ou encore de biochar (biomasse pyrolysée) et de microbes du sol. Nous luttons contre les parasites en cultivant des « mauvaises herbes » qui fournissent des habitats tant aux prédateurs à insectes parasites tels les araignées, les fourmis et les reptiles qu'aux parasites eux-mêmes. Une autre stratégie consiste à maintenir des flaques d'eau servant d'habitats de reproduction aux insectes aquatiques et aux grenouilles, qui chassent aussi les parasites des cultures. Occasionnellement, nous utilisons aussi des répulsifs antiparasitaires à base de plantes telles que le tabac, l'ail et le tulsi (*Ocimum sanctum*; connu aussi sous le nom de basilic sacré). Les maladies végétales ne sont jamais un problème à Basudha: avoir des variétés et des espèces diverses est la meilleure stratégie de protection contre les agents pathogènes des cultures, selon nombre d'études.

Les semences récoltées sont en partie stockées dans des poteries, ce qui les protège des insectes et des rongeurs tout en leur permettant de « respirer » jusqu'aux semailles suivantes. Nous distribuons le reste des graines, en échange d'une poignée de semences d'autres variétés indigènes, que nous cultivons et

© Zoé Savitz

L'auteur et son associé Debdulal Bhattacharya examinent et décrivent les grains de riz de la nouvelle récolte.

redonnons. Ce système est une tentative raisonnée de faire revivre les échanges traditionnels de semences, cette pratique ancienne qui a concouru autrefois à répandre les variétés cultivées sur les continents.

Mes collègues et moi-même avons aussi contribué à la création de plus de vingt autres banques de semences dans différentes régions de l'Inde, afin que les riziculteurs locaux puissent obtenir les variétés dont ils ont besoin sans avoir à se rendre à Vrihi. Nous encourageons également les réseaux d'échange de semences entre riziculteurs. Nos banques et ces réseaux ont bénéficié à plus de 7800 riziculteurs dans cinq États indiens. En outre, nous

> **182 variétés de notre collection ont aujourd'hui disparu des champs indiens**
>
> **Debal Deb**

documentons les caractères et les propriétés de chaque variété indigène et les enregistrons au nom des riziculteurs qui les fournissent afin d'éviter toute biopiraterie. Nous visons par là à restaurer la souveraineté des riziculteurs sur les semences, essentielle à leur sécurité financière et nutritionnelle à long terme.

DES CÉRÉALES AUX MILLE VERTUS

Nous espérons ainsi réduire la précarité des riziculteurs. Dans les exploitations agricoles précaires pour cause de sécheresse ou d'inondations saisonnières, les variétés traditionnelles sont le seul moyen fiable d'assurer la sécurité alimentaire des riziculteurs pauvres. Après vingt-deux ans de culture de ces variétés, je suis convaincu qu'en cas de sécheresse, le kelas, le rangi, le gadaba, le kaya ou le velchi donneront des rendements supérieurs à ceux de tous les riz modernes. Les variétés lakshmi dighal, rani kajal et jabra, qui allongent leurs tiges lorsque la crue monte, sont capables de maintenir leurs panicules porteuses de graines hors de l'eau jusqu'à quatre mètres d'eau. Les riz matla, getu tulmugur et kallurundai réussissent à pousser sur un sol salin et survivent à l'incursion d'eau de mer. Ces variétés indigènes sont des lignées stables dotées d'une série de gènes conférant une large plasticité adaptative.

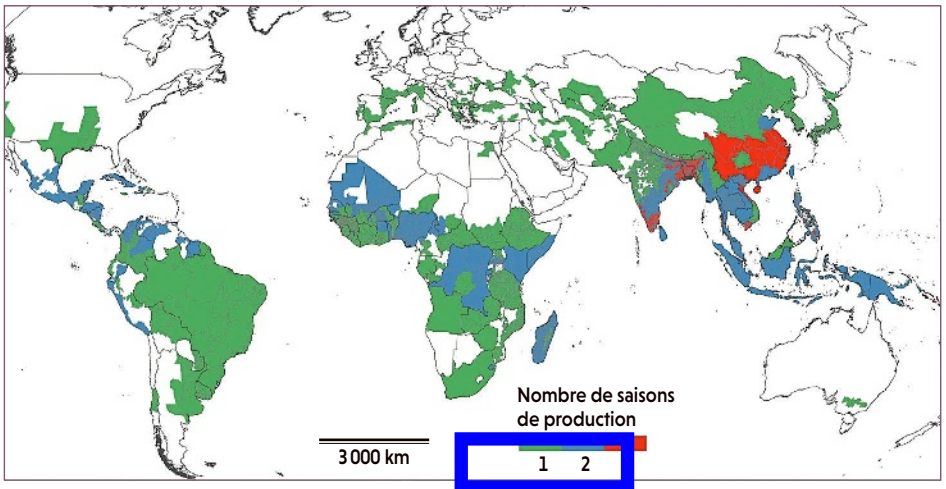
En outre, étant donné les conditions optimales du sol dans les exploitations agricoles alimentées par la pluie, nombre de variétés de riz traditionnels tels le bahurupi, le bourani, le kerala sundari ou encore le nagra parviennent à dépasser les rendements des variétés modernes. Quelques-uns ont même des rendements relativement élevés. Il s'agit notamment des riz à double et à triple grains, des variétés peut-être issues de sélections et de mutations rares des gènes structuraux de la fleur de riz. Notre ferme semble être la dernière dépositaire de l'une de ces variétés de riz à triple grain: le sateen.

Par ailleurs, plusieurs variétés indigènes résistent bien aux parasites et aux agents pathogènes. Les riz kalo nunia, kalanamak, kartik-sal et tulsi manjari sont robustes face au champignon *Magnaporthe oryzae*, un des agents pathogènes du riz les plus dévastateurs. Le bishnubhog et le rani kajal sont résistants au flétrissement bactérien du riz, une autre maladie parmi les plus graves. Le riz kataribhog est modérément résistant au virus du tungro, un virus qui ravage les cultures du sud et du sud-est de l'Asie depuis plusieurs décennies. Les variétés gourkaitai, jashua et shatia semblent résister au lépidoptère *Nymphula depunctalis*, qui s'en prend aux feuilles des plants de riz et cause de sévères défoliations. Enfin, les attaques des insectes foreurs de tiges sur les variétés khudi khasa, loha gorah, malabati, sada dhepa et sindur mukhi sont rares. Au cours des quelque vingt-cinq dernières années, toutes ces semences distribuées par Vrihi ont réduit les pertes de récoltes dues aux parasites et aux maladies de milliers d'exploitations.

Aujourd'hui, la sélection de nouvelles variétés de riz est axée sur l'augmentation du nombre de grains, mais les divers micronutriments que contiennent les nombreuses variétés indigènes de riz sont absents des cultivars modernes. Nos recherches récentes ont identifié au moins 80 variétés populaires contenant plus de 2 milligrammes de fer par kilogramme de riz, voire entre 131 et 140 pour le harin kajli, le dudhé bolta et le jhuli. Une fourchette à comparer aux 9,8 milligrammes de fer par kilogramme du riz transgénique enrichi en fer de la variété IR68144-2B-2-2-3, développé à grands frais par l'Irri.

Certaines variétés indigènes pourraient aussi être utiles en médecine. L'ayurvéda, le système de médecine traditionnelle indienne, recommande le riz nyavara du Kerala pour aider à traiter une classe de troubles neurologiques. Avec mes collègues, nous analysons sa chimie et espérons étudier son efficacité dans le traitement de ces affections. Un autre riz médicinal, le garib-sal du Bengale-Occidental, est prescrit en médecine traditionnelle dans le traitement des infections gastro-entériques. De fait, dans un article publié en 2017, mes collaborateurs et moi-même avons documenté la bioaccumulation d'argent dans les grains de garib-sal (15 parties par million). Or, >

LA RECHERCHE SUR LE RIZ DEPUIS LA RÉVOLUTION VERTE



La base RiceAtlas, mise au point par une équipe de l'Irri, répertorie plus de 2 700 unités spatiales de culture de riz et le nombre de saisons où l'on peut le récolter.

Le bilan de la Révolution verte divise les spécialistes. Pendant cette période qui va de 1950 à 1970, des politiques publiques affirmées ont promu une industrialisation rapide de l'agriculture par le moyen d'évolutions technologiques et sociales. On a alors intensifié la mécanisation agricole, l'irrigation, l'utilisation d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires et introduit des variétés végétales capables de valoriser ces investissements ; dans le même temps, les agriculteurs ont été poussés à se spécialiser. La Révolution verte – un terme qui fait allusion à la Révolution rouge communiste et à la Révolution blanche despotique – concerne les pays en développement, mais l'agriculture des pays développés a connu une évolution parallèle. Certains y voient le recul tant attendu de la famine dans les pays en ayant vraiment besoin ; d'autres considèrent plutôt que l'objectif unique de rendement a conduit à une destruction massive des environnements, à des ruptures d'équilibres biologiques et sociaux tout en accentuant les inégalités sociales.

Depuis une trentaine d'années, cependant, un nouveau paradigme prend le relais, qui fixe comme objectif un développement durable et équitable. L'Organisation des Nations Unies le décline actuellement en 17 objectifs, dont la recherche internationale tire ses grandes orientations en particulier s'agissant de développement agricole.

Dans ce concert, le Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (GCRAI) joue un rôle central. Ce consortium d'une quinzaine d'instituts et de centres focalisés sur la recherche agronomique pour le développement englobe les instituts promoteurs de la Révolution verte (dont l'Institut international de recherche sur le riz – l'Irri – et Bioversity International). Le GCRAI est financé par des crédits internationaux et par de grandes fondations privées, et chargé de mettre en œuvre de grands programmes. Celui du riz est coordonné au niveau mondial par trois membres du GCRAI (l'Irri, le Centre international d'agriculture tropicale et le Centre du riz pour l'Afrique), deux organismes français (le Cirad et l'IRD) et le Centre de recherche international japonais pour les sciences de l'agriculture (le JIRCAS), et il associe les instituts de recherche de nombreux autres pays.

Cinq projets étendards sont en cours : caractérisation de la diversité des riz, développement de nouvelles variétés, élaboration de systèmes de culture durables, développement de nouvelles chaînes de valeur et finalement intégration de tout cela dans une riziculture plus équitable. Leurs objectifs pour 2022 ciblent une augmentation de la sécurité alimentaire et nutritionnelle (carence en zinc en particulier) dans un meilleur respect de l'environnement. Nous sommes loin des objectifs des années 1960 centrés sur le rendement !

Autre aspect : les collections internationales des GCRAI sont maintenant gérées par le Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (Tirpaa) qui permet le partage juste et équitable des avantages découlant de leur utilisation par tous. Ainsi, entre 2014 et 2018, l'Irri, dont la collection renferme plus de 130 000 variétés, a distribué chaque année près de 9 000 lots de semences en dehors du GCRAI. Ces lots sont assortis d'un agrément standard qui assure la traçabilité complète de ces graines, prévenant ainsi les tentatives d'appropriation abusive et libérant des impératifs de protection qui existaient à certaines époques. L'idée est bien de préserver et mettre au service des agricultures du monde cette biodiversité issue de millénaires de gestion paysanne.

Entre 2014 et 2018, l'Irri a distribué près de 9 000 lots de riz par an

Comme le fait remarquer Debal Deb, les variétés mises en collection n'y a plusieurs décennies n'ont pas pu coévoluer avec les environnements de culture, mais elles ont préservé des formes rares d'adaptation qui peuvent être remobilisées dans de nouveaux systèmes avec de nouveaux objectifs. Cela n'enlève rien à la valeur d'initiatives comme celle du centre de distribution de semences de variétés traditionnelles qu'il anime avec rigueur, passion et efficacité. Et encore moins à la valeur des savoirs traditionnels attachés à ces variétés. C'est probablement la déconcentration de la pratique de l'amélioration des plantes qui permettra de répondre au mieux aux grands enjeux de préservation des ressources du passé, d'exploitation des capacités de valorisation de la diversité génétique et d'adaptation des variétés cultivées à une multitude de conditions locales et d'usages différents.

JEAN CHRISTOPHE GLASZMANN

© A. Laborte et al., Sci. Data, vol. 4, article 170074, 2017 (CC BY 4.0)

> selon des travaux de Kyaw Kaung, de l'université de Kumamoto, au Japon, et ses collègues, publiés la même année, les nanoparticules d'argent se révèlent capables de détruire des biofilms de bactéries du genre *Salmonella* et *Pseudomonas*, sources de pathologies intestinales humaines. Ce riz pourrait donc aider à combattre de telles bactéries. Une pléthore de variétés médicinales de riz de ce type attendent d'être testées en laboratoire et en clinique.

Une autre valeur chère aux riziculteurs indigènes est la beauté du riz. Ils cultivent certaines variétés indigènes uniquement pour leurs couleurs ou leurs motifs : sillons dorés, bruns violets et noirs sur les balles jaunes du riz, apex violets (l'apex est la pointe du grain), barbes noires, etc. Nombreux sont ceux qui, dans l'est de l'Inde, sont fiers des riz moynatundi et anigali et de la beauté des extensions ailées des glumelles stériles. Dans toutes les cultures fondées sur l'exploitation du riz, les variétés aromatiques sont associées aux cérémonies religieuses et aux festivals traditionnels. Lorsque ces types de riz disparaissent des champs, de nombreuses préparations culinaires cessent d'être possibles et les cérémonies associées perdent une part de leur signification culturelle et symbolique. Les 195 variétés de riz aromatiques de la ferme Basudha ont déjà contribué à faire revivre de nombreuses traditions locales en voie de disparition.

UNE BIODIVERSITÉ SACRALISÉE DANS LES RITES RELIGIEUX

La complexité des interactions écologiques a donné naissance à une autre série de variétés de riz. Les petits riziculteurs du Bengale-Occidental et du Jharkhand préfèrent les variétés à barbes longues et fortes (arêtes situées à l'extrémité de l'enveloppe du grain), qui découragent les bovins et les chèvres. Les riziculteurs optent aussi pour les variétés indigènes comportant des feuilles paniculaires dressées, car les oiseaux granivores ne peuvent pas s'y percher.

À l'inverse, certains riziculteurs d'Odisha cultivent une combinaison de variétés barbées ou non, indépendamment de leur intérêt direct. D'autres variétés rares possèdent des tiges et des feuilles violettes, sans que l'utilité de ce trait ne soit évidente. En fait, dans la tradition sud-asiatique, la biodiversité paraît si essentielle à l'agriculture qu'elle a été sacralisée dans des rites religieux. Certains parents sauvages du riz cultivé, comme le buno dhan (*Oryza rufipogon*) et l'uri dhan (*Hygroryza asiatica*), sont par exemple associés à des rites hindous locaux et conservés dans de nombreuses exploitations du Bengale-Occidental et de l'État voisin du Jharkhand. L'importance de ces bassins génétiques sauvages, sources de traits inhabituels pouvant être incorporés si nécessaire dans des cultivars existants, n'a jamais été aussi grande.

La présence dans les rizières de certains arbres tels que le neem (*Azadirachta indica*), dont les feuilles constituent un pesticide naturel, et de prédateurs telle la chouette, est aussi considérée comme favorable.

En mai 2009, le cyclone Aila a frappé la côte des Sundarbans, au Bengale-Occidental et au Bangladesh ; il a fait près de 350 morts et détruit les habitations de plus d'un million de personnes ;

Le riz garib sal aiderait à combattre des pathologies intestinales bactériennes

une vague marine due à la tempête a inondé les champs, les polluant de sel, ce qui a mis la sécurité alimentaire de la région en danger. Apprenant cela, nous avons distribué à quelques riziculteurs des villages insulaires des Sundarbans une petite quantité de semences de variétés tolérant la salinité (lal getu, nona bokra, talmugur) et provenant de Vrihi. Ces variétés se sont révélées les seules capables de produire une quantité importante de grains dans les fermes salées pendant cette saison désastreuse. De même, en 1999, plusieurs variétés populaires telles que jabra rani, kajal et lakshmi dighal ont assuré la production de riz des riziculteurs du sud du Bengale après une crue soudaine de la rivière Hugli. Et en 2010, les variétés bhutmuri, kalo gorah, kelas et rang ont sauvé de nombreux riziculteurs indigènes dans le district de Puruliya (Bengale-Occidental) lorsque l'arrivée tardive de la mousson a provoqué une grave sécheresse.

Ces catastrophes et leurs solutions prouvent que le maintien d'une riziculture durable dépend de façon essentielle de la restauration des pratiques agricoles traditionnelles, car elles permettent d'avoir recours au spectre entier des variétés ayant survécu à l'arrivée de l'agriculture industrielle. Convaincus par la stabilité supérieure des rendements des variétés indigènes, plus de 2000 riziculteurs de l'Odisha, de l'Andhra Pradesh, du Bengale-Occidental, du Karnataka, du Kerala et du Maharashtra ont déjà adopté plusieurs variétés traditionnelles de riz fournies par Vrihi et abandonné la culture de celles à haut rendement. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. S. Gupta *et al.*, **Unusual accumulation of silver in the alcaronic layer of an Indian rice (*Oryza sativa*) landrace and sustainable extraction of the metal,** *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol.5(9), pp. 8310-8316, 2017.

D. Deb *et al.*, **Variable effects of biochar and P solubilizing microbes on crop productivity in different soil conditions,** *Agroecol. Sust. Food*, vol. 40(2), pp. 145-168, 2016.

D. Chakraborty *et al.*, **An analysis of variation of the aroma gene in rice (*Oryza sativa* L. subsp. *indica* Kato) landraces,** *Genet. Resour. Crop. Evol.*, vol. 63, pp 953-959, 2016.

D. Deb *et al.*, **A profile of heavy metals in rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) landraces,** *Current Science*, vol. 109(3) pp. 407-409, 2015.

M. Mukerjee, **The imperial roots of hunger,** *Himal. Southasian*, vol. 26(2) pp. 12-25, 2013.

L'ESSENTIEL

> Dans le Système solaire, de nombreux astéroïdes et comètes sont susceptibles de croiser la trajectoire de la Terre. Un impact pourrait être catastrophique.

> Plusieurs sondes spatiales explorent des astéroïdes et des comètes pour mieux connaître ces objets.

> Des systèmes de surveillance sont mis en place pour suivre ces corps célestes et l'on prévoit de tester des façons de dévier leur trajectoire.

> La science-fiction s'inspire de ces menaces bien réelles et propose parfois des scénarios intéressants.

LES AUTEURS

JEAN-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue au CNRS-MNHN à Paris

ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien au CEA, à Saclay

Impact ! La menace venue de l'espace

Elles ont mis fin au règne des dinosaures et détruisent des villes et des civilisations dans les films catastrophes. Mais avons-nous les moyens d'empêcher que l'une de ces météorites géantes entre en collision avec la Terre ?

Si les astéroïdes, les comètes et les météorites nous passionnent, c'est peut-être que ces objets sont à la fois des symboles de vie et de mort. De vie, car ils auraient fourni à la Terre une grande part de son eau lors d'intenses bombardements il y a environ 4 milliards d'années. Et d'après certains scénarios, ils auraient aussi apporté sur la planète des molécules complexes, telles que des aminoacides, qui constituent les briques élémentaires du vivant (ce scénario, nommé panspermie, reste à démontrer). Mais les météorites sont aussi sources de mort, comme nous le rappellent les dinosaures non aviens disparus il y a 66 millions d'années…

Moteurs à la fois d'apparition et d'extinction du vivant, ces bolides de l'espace, qui filent à une vitesse comprise entre 12 et 72 kilomètres par seconde par rapport à la Terre, ont donc un statut tout particulier dans notre imaginaire collectif. La menace que représentent ces objets tombés du ciel est un grand classique des œuvres de science-fiction. Toutefois, face à un danger bien réel, quelles sont aujourd'hui les stratégies à l'étude pour éviter un impact cataclysmique ?

Pour répondre au mieux à cette menace, les œuvres de fiction donnent des pistes. Mais c'est dans la science et les techniques que les chercheurs et les ingénieurs puisent des solutions concrètes. Ces dernières années, notamment grâce à des sondes spatiales qui ont observé de près des comètes et des astéroïdes, les astrophysiciens ont amélioré leur connaissance de ces corps. Ils ont une meilleure appréciation de leur composition, de leur nombre, de leur origine, de leur trajectoire…

De tous les corps célestes, les plus spectaculaires sont certainement les comètes. Il s'agit de petits objets (de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres de diamètre) en orbite autour du Soleil et caractérisés par un noyau, une chevelure (*o kométês* signifie « astre chevelu » en grec) et une ou plusieurs queues (ou traînées).

Le noyau est constitué principalement de roche et de glace – les astrophysiciens parlent de « neige sale ». La chevelure ou *coma* qui résulte de la sublimation de cette glace à l'approche du Soleil, est un halo de gaz et de poussières d'environ 50 000 à 250 000 kilomètres de diamètre entourant le noyau. Enfin, à la queue

© Capture d'écran / Armageddon/Touchstone Pictures

ionisée semblable à une ombre bleutée, s'ajoutent une longue queue d'hydrogène non lumineuse mais détectable par ondes radio et une queue de poussières dont la taille dépend de celle du noyau : de 30 à 80 millions de kilomètres de long. Très brillante, cette dernière est parfois visible en plein jour : pas étonnant alors que les comètes déchaînent les passions depuis des millénaires !

LA CÉLÈBRE COMÈTE DE HALLEY

Au VIe siècle avant notre ère, l'astronome Apollonios de Myndos supposait déjà que les comètes étaient des astres ayant une trajectoire périodique. C'est seulement au XVIIe siècle qu'Isaac Newton a démontré qu'elles possèdent leur propre masse et obéissent aux mêmes lois de la gravitation régissant les autres corps célestes : elles présentent une trajectoire elliptique. Son ami astronome Edmond Halley, très impressionné par son traité *Du mouvement des corps en rotation* (1684), s'est alors attelé à étudier une comète en particulier. Et pas n'importe laquelle : elle est historiquement la première dont on retrouve un enregistrement de son passage – comme en témoigne sa présence sur une gravure chinoise datant de 1059 avant notre ère.

Suite à son passage remarqué en 168[illegible] (de notre ère), Halley a calculé que la comète [illegible]erait son grand retour soixante-seize ans plus tard, à Noël 1758. Malheureusement, mort en [illegible]742, l'astronome n'a pas assisté à son grand triomphe : la comète a été détectée le 25 décembre 1758 exactement là où il l'avait prédit.

Forte de sa célébrité, la comète de Halley s'invite dans de nombreuses œuvres de fiction. Par exemple, dans le jeu vidéo *Shadow of the Comet* (1993) ancré dans l'univers horrifique de l'écrivain américain Howard Phillips Lovecraft, le joueur est plongé dans la peau d'un enquêteur censé prendre des photos de l'objet céleste de passage au-dessus de l'étrange ville d'Innsmouth…

La mauvaise réputation des comètes est tenace. Pour le mathématicien et historien William Whiston (1667-1752), la comète de Kirch, observée en 1680, aurait été responsable du déluge mentionné dans la Bible. En [illegible]4, >

Dans le film *Armaggedon*, Bruce Willis et ses coéquipiers [illegible]de la dernière chance : faire exploser une charge nucléaire sur un astéroïde qui se dirige vers la Terre.

> dans son roman noir *La Fin du monde* (adapté à l'écran par le réalisateur Abel Gance en 1931), l'astronome Camille Flammarion a imaginé une comète dévastatrice percutant la Terre au XXIVe siècle.

Rares sont donc les comètes synonymes d'heureux événements, sauf peut-être pour Herbert G. Wells qui positive avec *Au temps de la comète* (1905), fiction dans laquelle la queue d'une comète frôlant la Terre modifie la composition atmosphérique. Cela transforme l'humanité en une espèce utopique: «Le grand changement est venu pour toujours, le bonheur et la beauté règnent, la Terre est en paix car les hommes sont de bonne volonté.»

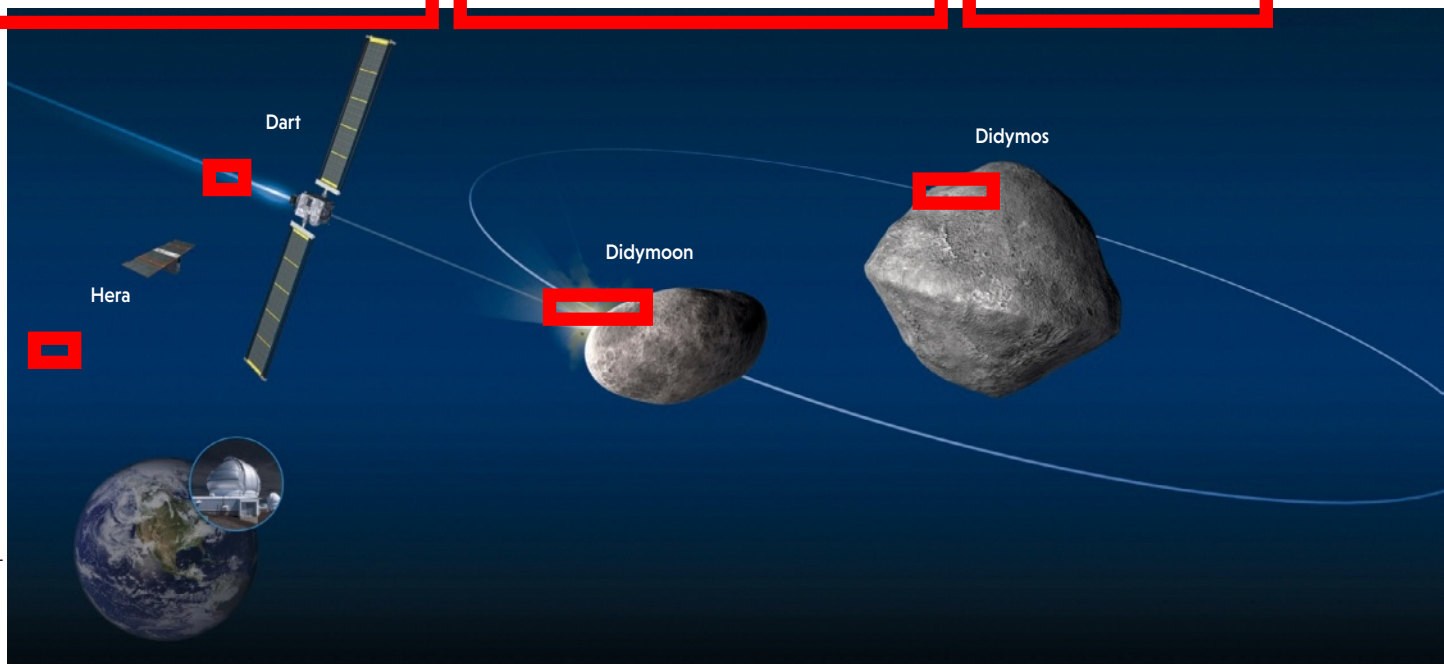
Si des astéroïdes pénètrent dans l'atmosphère terrestre, une fois au sol, on parle alors de météorites. Et ces corps figurent aussi en bonne place dans les fictions. Pauvres en éléments volatils, les astéroïdes ne présentent pas de queue comme les comètes. Néanmoins, ces dernières années, certains astéroïdes ont démontré une activité de surface qui ressemble à petite échelle à celle d'une comète. On en distingue plusieurs types selon leur composition: type C pour les objets riches en carbone, type S pour les silicatés, type M pour les métalliques et enfin type V, plus rares, pour les astéroïdes basaltiques.

Dans l'univers des comics et films Marvel, une météorite d'un type particulier aurait frappé l'Afrique il y a des millions d'années. Elle contenait un super-minerai, le vibranium, grâce auquel le roi justicier du Wakanda (*alias* la Panthère noire) développe des technologies très avancées. Mais les impacts météoritiques du cinéma apportent aussi leur lot de virus, de maladies ou de parasites extraterrestres, comme s'ils participaient d'une sorte d'antipanspermie, à l'image du blob, gelée envahissante et dévastatrice transportée par une météorite dans le film éponyme de 1958 (et ses nombreux *remakes*).

Le 25 décembre 1758, on a détecté la comète exactement là où Halley l'avait prédit

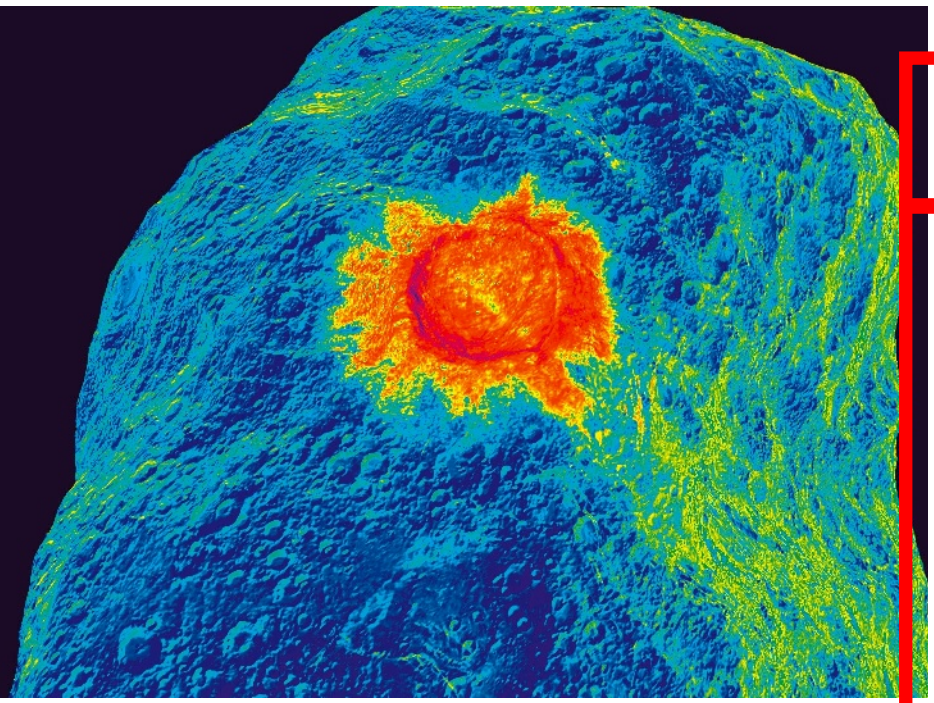
La plupart des météorites proviennent de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, aussi nommée «ceinture principale». La présence de ceintures d'astéroïdes est un grand classique des *space operas*.

Par exemple, dans *Star Wars episode V: L'Empire contre-attaque* (1980), le *Faucon Millenium* de Han Solo, alors traqué par des chasseurs de l'Empire, se faufile avec dextérité entre les astéroïdes de la ceinture de Hoth (système fictif comprenant la planète glacée du même nom). Paniqué, le droïde C-3PO à bord s'exclame: «Les chances de traverser un champ d'astéroïdes avec succès sont approximativement de 1 sur 3 720». Même si la ceinture de Hoth présente en effet une forte densité de gros astéroïdes, on peut se demander d'où sort ce chiffre qui, en réalité, varie selon la densité en astéroïdes, leurs tailles, les dimensions de la ceinture, la taille du



© Nasa - J. Hopkins - APL

Dans la mission conjointe de la Nasa et de l'ESA, la sonde *Dart* rejoindra l'astéroïde Didymos et sa lune Didymoon en octobre 2022. Elle déploiera un nanosatellite pour suivre les premiers instants de la collision avec l'impacteur. La sonde *Hera* arrivera en 2027 pour analyser avec précision la déviation obtenue.



Vue d'artiste d'une image infrarouge du cratère produit par l'impacteur de la sonde *Dart* sur Didymoon.

vaisseau et sa vitesse relative. Notre ceinture principale, bien que contenant plus de 1 million d'objets de plus de 1 kilomètre de diamètre, est beaucoup moins dense que cette ceinture fictive: la distance moyenne entre astéroïdes y est de l'ordre de 1 million de kilomètres.

Dans la ceinture principale, la taille des astéroïdes est en fait très variable, du simple caillou à la planète naine Cérès (974 kilomètres de diamètre). Leurs vitesses sont telles que les collisions dans la ceinture sont assez fréquentes à l'échelle astronomique: selon les modèles, les astéroïdes de plus de 10 kilomètres de diamètre se percutent tous les 10 millions d'années en moyenne, mais les plus petits se rencontrent plus souvent. Si ces collisions sont violentes, les débris prennent la forme de très petits corps nommés « météoroïdes », potentiellement menaçants pour nous, car s'ils sont éjectés de la ceinture, ils peuvent alors croiser notre chemin et frapper la Terre.

DES RÉSERVOIRS GLACÉS ET LOINTAINS

Les comètes, quant à elles, proviennent de beaucoup plus loin, généralement de la ceinture de Kuiper (pour celles ayant une période inférieure à deux cents ans) ou du nuage d'Öpik-Oort (pour celles ayant une période plus longue). La ceinture de Kuiper, qui s'étend au-delà de Neptune, entre 30 et 55 unités astronomiques (la distance moyenne Terre-Soleil définit l'unité astronomique, soit environ 150 millions de kilomètres), est 20 fois plus large et 20 à 200 fois plus massive que la ceinture principale d'astéroïdes. En plus de ses trois planètes naines, Pluton (et son double Charon), Haumea et Makemake (découvertes respectivement en 2004 et 2005), les nombreux objets qui composent la ceinture de Kuiper sont principalement composés d'éléments volatils gelés comme l'ammoniac, l'eau et le méthane.

Plus vaste et plus éloigné que la ceinture de Kuiper, le nuage d'Öpik-Oort est situé en bordure et à l'extérieur du Système solaire, à une distance du Soleil comprise entre 20 000 et 100 000 unités astronomiques. Il s'agit d'une énorme structure encore hypothétique (car jamais observée directement), modélisée par une zone externe sphérique et une zone interne en forme de tore. La présence d'un tel nuage a été envisagée dès 1932 par l'astronome estonien Ernst Öpik qui invoquait ce réservoir pour expliquer l'origine de comètes non périodiques. Ce nuage regrouperait des milliers de milliards de noyaux de comètes de diamètre supérieur au kilomètre, dont certains seraient parfois déviés par la gravité des étoiles voisines et se dirigeraient alors vers l'intérieur du Système solaire.

Le nuage d'Öpik-Oort serait constitué des restes du disque protoplanétaire formé autour du Soleil lors de sa naissance, il y a quelque 4,6 milliards d'années. La ceinture principale d'astéroïdes, quant à elle, serait une collection de débris du Système solaire primitif n'ayant pas formé de planètes. Mais libre aux auteurs de fiction d'inventer d'autres origines. Dans le mythe de Cthulhu façonné par Lovecraft, la ceinture principale d'astéroïdes est en fait constituée de restes de planètes volontairement détruites par une entité extraterrestre surpuissante du nom d'Azathoth – dont la première mention apparaît dans une lettre de 1919 que l'écrivain rédige pour lui-même.

Comme nous l'avons évoqué, pour diverses raisons (collisions, perturbations gravitationnelles), certains des constituants des réservoirs d'astéroïdes et de comètes se retrouvent propulsés vers l'intérieur du Système solaire et peuvent parfois croiser le chemin de la Terre. Il est alors indispensable de surveiller ces objets du mieux possible.

Depuis 1947, le Centre des planètes mineures a pour mission de collecter des données sur les astéroïdes et les comètes du Système solaire, de calculer leurs orbites et de diffuser ces informations. Cet organisme sous la tutelle de l'Union astronomique internationale, a notamment recensé 4086 comètes. Mais pour en savoir plus sur ces objets, il faut les scruter de plus près.

Ainsi, en 1986, lors de son dernier passage, la comète de Halley a été auscultée par pas moins de six sondes spatiales, dont *Giotto* conçue par l'Agence spatiale européenne. Cette sonde s'est approchée à seulement 600 kilomètres de la comète – une première pour l'époque – et a mis en évidence la forme en cacahuète de son noyau (16×8×7 kilomètres) >

© ESA-ScienceOffice.org

> ainsi que la présence de deux jets alimentant sa chevelure et sa queue.

Aujourd'hui, les sondes ne se contentent pas de frôler les comètes. Elles s'y posent déjà (comme l'a fait l'atterrisseur *Philae* de la sonde *Rosetta* sur la comète Tchouri en novembre 2014) ou ramèneront des échantillons sur Terre dans un futur proche. C'est le cas de la mission *Hayabusa2*, de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise, dont l'objectif est l'astéroïde Ryugu, et de la mission *OSIRIS-REx*, de la Nasa, qui rend visite à Bennu; avec des retours prévus pour 2020 et 2023 respectivement.

D'autres sondes tirent sur leur cible avec des projectiles. Ces «impacteurs» percutent l'astéroïde ou la comète pour en analyser les éjectas. C'est le cas de *Deep Impact*, la première sonde du genre, lancée début 2005 par la Nasa. Après avoir projeté son impacteur sur la comète Tempel 1 – précisant sa composition qui restait débattue –, *Deep Impact* s'est rapprochée d'une autre cible en 2010, la comète Hartley 2. La sonde a effectué des prises de vues à 700 kilomètres de distance et a mis en évidence des jets de gaz avant de disparaître définitivement des radars en 2013.

MOUSTIQUE CONTRE BOEING 747

En théorie, *Deep Impact* devait aussi tester la possibilité de dévier des géocroiseurs (ou *near Earth objects* en anglais), c'est-à-dire des objets dont la trajectoire croise l'orbite de la Terre et qui sont potentiellement menaçants. Hélas, son impacteur de 372 kilogrammes, même s'il a percuté la comète à une vitesse de 10,2 kilomètres par seconde et y a créé un cratère de 30 mètres de diamètre, a eu autant d'effet qu'«un moustique percutant un Boeing 747», pour reprendre les termes d'un responsable de la Nasa.

D'ailleurs, notons que *Deep Impact* est aussi le titre d'un film catastrophe de 1998 qui a le mérite d'imaginer les conséquences sociologiques d'un tel impact. Dans ce nanar, la comète (imaginaire) Wolf-Biederman menace de s'écraser sur Terre et d'anéantir les États-Unis. L'impact étant imminent, le président enclenche alors le protocole *Extinction level event* («Événement de niveau extinction») consistant à sélectionner un million d'Américains autorisés à s'abriter dans un bunker géant pendant deux ans, le temps que les effets de l'impact s'estompent.

Dans la réalité, un tel événement serait effectivement dévastateur, comme le soulignait le cosmologiste Stephen Hawking en 2010: «La possibilité qu'un astéroïde nous anéantisse n'est pas juste le fait des films catastrophes d'Hollywood, la menace est réelle.» D'après les modèles des géophysiciens, un bolide d'environ 10 kilomètres de diamètre percutant la Terre éjecterait dans l'atmosphère près de 2500 milliards de tonnes de poussières, de quoi obscurcir l'ensemble du ciel, stopper la photosynthèse des plantes et refroidir le climat global pendant un temps considérable.

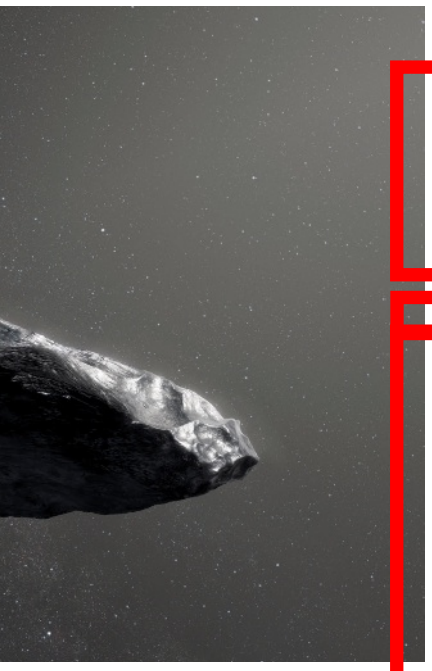
Ce scénario nommé «hiver d'impact» serait en partie responsable de certaines des grandes crises de la vie, comme celle du Crétacé-Paléogène il y a 66 millions d'années, durant laquelle 70% des espèces (dont les dinosaures non aviens) ont disparu. Le cratère de Chicxulub, au Mexique, large d'environ 180 kilomètres, est très probablement le vestige d'un impact dû à un astéroïde d'une dizaine de kilomètres de diamètre. La crise Permien-Trias, il y a 252 millions d'années, durant laquelle 90% des espèces se sont éteintes – soit la quasi-totalité de la biosphère de l'époque – pourrait avoir une origine similaire.

Un impact d'une telle envergure serait aujourd'hui catastrophique non seulement pour l'espèce humaine (nous n'avons clairement ni les réserves ni l'espace suffisant pour abriter l'humanité tout entière pendant un hiver d'impact), mais aussi pour de nombreuses autres: l'arrêt momentané de la photosynthèse aurait des répercussions dramatiques sur tous les écosystèmes, aussi bien terrestres que marins.

Certes, les bolides les plus gros sont aussi les plus rares, mais on estime qu'en moyenne, un astéroïde de 100 mètres percute la Terre tous les 5000 ans, libérant ainsi une énergie équivalente à 100 mégatonnes de TNT. On comprend alors que les 21000 géocroiseurs actuellement recensés dans le ciel fassent l'objet de toutes les attentions. Officiellement, ceux dont le diamètre est supérieur à 140 mètres et susceptibles de passer à moins

Vue d'artiste de l'astéroïde 'Oumuamua. C'est le premier objet interstellaire découvert traversant le Système solaire. Sa forme n'est pas sans rappeler celle de certains vaisseaux spatiaux de la science-fiction.

© ESO/M. Kornmesser



de 7480000 kilomètres de la Terre (soit 1/20 de la distance moyenne Terre-Soleil) sont classés dans la catégorie des «Objets potentiellement dangereux» (OPD). C'est par exemple le cas de l'astéroïde Toutatis, en forme de haricot et d'environ 3 kilomètres de diamètre moyen pour une masse de 50 milliards de tonnes.

UNE MENACE BIEN RÉELLE

Les OPD sont étroitement surveillés depuis la fin des années 1990. La prise de conscience de la menace qu'ils représentent est devenue très concrète lors de la spectaculaire collision des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 avec la planète Jupiter en juillet 1994, et dont les impacts ont été nettement visibles. Cela s'est aussi accompagné de la reconnaissance que des géocroiseurs pouvaient être des causes possibles de grandes extinctions, alors qu'auparavant, les paléontologues misaient plutôt sur les variations du niveau des mers et les volcans.

Actuellement, plusieurs campagnes d'observation dans les domaines radio et infrarouge ayant pour objectif de classifier les OPD (à l'aide de diverses échelles de risque) sont menées. Elles visent au recensement exhaustif des OPD et au suivi de leur trajectoire le plus tôt possible. La mission *Near-Earth Object Surveillance* de la Nasa a pour objectif d'envoyer un télescope infrarouge dans l'espace afin d'effectuer ce recensement en une décennie seulement. Cependant, la trajectoire de certains OPD comme Toutatis est particulièrement difficile à prévoir, en raison de leur déviation à chaque fois qu'ils frôlent la Terre ou d'autres planètes.

Et si l'un de ces objets devait percuter la Terre? Des programmes de «défense planétaire» sont à l'étude et financés par plusieurs agences spatiales internationales. C'est le cas de la mission *Dart* (*Double asteroid redirection test*, Test de redirection d'astéroïde binaire), de la Nasa. Son but: dévier légèrement la trajectoire de la lune qui accompagne un astéroïde, une configuration concernant 15% des astéroïdes qui évoluent dans l'environnement de la Terre. On cible le satellite, car ainsi on ne perturbe pas le système complet (la lune représente moins de 1% de la masse totale du système). En l'occurrence, la cible de *Dart* est Didymoon, lune rocheuse de 160 mètres qui accompagne Didymos (mot signifiant d'ailleurs «jumeau» en grec), un astéroïde de 780 mètres de diamètre. Découvert en 1996 grâce au programme *Spacewatch* pour la détection de géocroiseurs de l'université d'Arizona, Didymos a déjà frôlé la Terre le 13 novembre 2003.

La sonde *Dart*, dont le lancement est prévu pour juillet 2021, se propulsera vers l'astéroïde binaire pendant une année grâce à un moteur ionique alimenté par des panneaux solaires. Son impacteur percutera Didymoon à la vitesse de 6,6 kilomètres par seconde. En théorie, la collision est censée modifier la vitesse de rotation de Didymoon autour de Didymos de 1%, ce qui est suffisant pour tester cette technique d'impact sans trop perturber le mouvement héliocentrique du centre de masse du système. En complément de *Dart*, l'ESA prépare la mission *Hera*, dont Patrick Michel, astrophysicien du CNRS à l'observatoire de la Côte d'Azur, est le coordinateur scientifique. «*Hera* se placera en orbite autour de Didymos et mesurera la déviation de sa lune due à l'impact. La sonde analysera également le cratère produit, les propriétés physiques et la composition de Didymos», résume le chercheur.

Pour protéger la Terre de ces menaces venues du ciel, d'autres solutions existent sur le papier: dévier le géocroiseur d'une façon plus douce, mais continue, en utilisant l'attraction gravitationnelle d'un engin spatial très massif ou en orientant un de ses moteurs vers l'astéroïde, ou encore en modifiant l'albédo du géocroiseur pendant une longue durée – en utilisant alors la force produite par l'écart entre l'absorption solaire et le rayonnement thermique (c'est l'effet Yarkovsky, qui sera étudié par la sonde *OSIRIS-Rex* sur l'astéroïde Bennu).

Mais si le temps manque et que la menace est proche, une solution consisterait aussi à faire exploser une charge nucléaire sur le géocroiseur, ou non loin de sa surface. Tester cette solution de la dernière chance est strictement interdit par les traités internationaux, mais c'est pourtant ce que fait Bruce Willis dans *Armageddon* (film de Michael Bay, 1998) pour sauver le monde d'un astéroïde de la taille du Texas.

DES VISITEURS INTERSTELLAIRES

En 2017, le projet de surveillance *Pan-Starrs* (comparable à *Skywatch*) a détecté un nouvel objet baptisé 'Oumuamua. Son originalité? Il ne provient pas du Système solaire. Cet objet interstellaire n'a rendu qu'une brève visite au Soleil et sa cohorte de planètes. La forme allongée de 'Oumuamua n'est pas sans rappeler le vaisseau extraterrestre du roman *Rendez-vous avec Rama* d'Arthur C. Clarke, dont on fêtait le centenaire de la naissance en 2017.

L'astronome Abraham Loeb, de l'université Harvard, a alimenté l'idée de l'origine artificielle de 'Oumuamua. En analysant la trajectoire du bolide, il a suggéré que celui-ci était propulsé par une voile solaire. Si des explications plus classiques sont probablement plus raisonnables (des hétérogénéités dans la composition de l'astéroïde, un jet de dégazage, etc.), la science et la fiction semblent se mêler étroitement. En 2019, la comète Borissov a été le deuxième visiteur interstellaire à être détecté. Ceux-ci pourraient donc être plus fréquents qu'on ne le pense et constituent donc une nouvelle classe d'objets à surveiller de près! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Morbidelli *et al.*, **Debiased albedo distribution for Near Earth Objects**, *Icarus*, vol. 340, 113631, 2020.

D. Lauretta *et al.*, **Episodes of particle ejection from the surface of the active asteroid (101955) Bennu**, *Science*, vol. 366, eaay3544, 2019.

P. Michel *et al.*, **European component of the AIDA mission to a binary asteroid : Characterization and interpretation of the impact of the DART mission**, *Advances in Space Research*, vol. 62, pp. 2261-2272, 2018.

D. Lauretta, **Un vol de sept ans pour quelques grammes d'astéroïde**, *Pour la Science*, n° 488, octobre 2016.

RENDEZ-VOUS

P.58 *Logique & calcul*
P.64 *Idées de physique*
P.68 *Chroniques de l'évolution*
P.72 *Science & gastronomie*
P.74 *À picorer*

DESSINER UN ÉLÉPHANT AVEC UN SEUL PARAMÈTRE

Reproduire n'importe quel jeu de données en nombre fini, par exemple des points qui esquissent la silhouette d'un animal: c'est l'exploit que permet une fonction paramétrisée par un unique nombre réel.

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)

Supposons que l'on dispose de données et que l'on recherche une explication simple à ces données, ou au moins un modèle qui permette de les reproduire. On partira par exemple de valeurs de mesures qui, pour $x = 0, 1, \ldots, n$, donnent $y_0, y_1, \ldots, y_n$. Si l'on trouve une fonction f qui vérifie $f(0) = y_0$, $f(1) = y_1, \ldots, f(n) = y_n$, on sera assez satisfait. On utilisera f pour prédire $f(n+1)$, $f(n+2)$, ... et l'on analysera f pour comprendre les données étudiées et peut-être pour formuler une théorie les expliquant.

Bien évidemment, on recherche des fonctions f les plus simples possible. Les polynômes, c'est-à-dire les fonctions de la forme

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots + a_nx^n$$

sont parmi les plus simples. On sera donc assez satisfait si l'on trouve un polynôme qui reproduit $y_0, y_1, \ldots, y_n$.

Or le monde mathématique est généreux et permet souvent de faire tout ce que l'on veut. Un joli résultat, dénommé «théorème d'interpolation de Lagrange», indique que quelles que soient les données $y_0, y_1, \ldots, y_n$, il existe un polynôme de degré au plus n qui redonne $y_0, y_1, \ldots, y_n$ pour $x = 0, 1, \ldots, n$ (*voir l'encadré 2*). Mais ce polynôme est un surajustement (ou *overfitting*): on se donne trop de paramètres, ici les coefficients du polynôme, et ce que l'on trouve n'a pas vraiment d'intérêt car on était certain d'y arriver!

Aussi le calcul du polynôme d'interpolation de Lagrange ne permettra que très rarement d'anticiper ce qui se passe pour $n+1$, $n+2$, etc., et ce polynôme ne sera pas utile sur un plan théorique. Heureusement, il se peut que le polynôme trouvé soit de faible degré. Si c'est le cas, cela signifie que sa découverte aurait résulté de la prise en compte de moins de données (autant que le degré du polynôme plus une unité) et donc que le polynôme retrouve les autres données. Dans une telle situation, il ne sera pas absurde de croire que le polynôme calculé permet d'anticiper $f(n+1)$, $f(n+2)$ etc.

Le risque de surajustement est un problème important dans le domaine de l'apprentissage profond en intelligence artificielle, car il conduit à des réseaux de neurones qui sont bien adaptés à un grand ensemble de données... et à rien d'autre.

À propos du choix des paramètres dans un modèle, le mathématicien d'origine hongroise John von Neumann a fait une remarque amusante: «Avec quatre paramètres, je peux faire un éléphant, et avec cinq, je peux faire remuer sa trompe.»

UN SEUL PARAMÈTRE SUFFIT POUR TOUT AJUSTEMENT

Un article récent de Steven Piantadosi, du Département de psychologie de l'université de Californie à Berkeley, a montré que von Neumann aurait pu remplacer le nombre «quatre» de sa phrase par le nombre «un». L'article est bien sûr un jeu, mais ce qu'il montre, en mettant en œuvre des mathématiques assez simples, est remarquable et doit servir de mise en garde: un seul paramètre permet d'ajuster une fonction pour qu'elle redonne mille données ou un milliard si l'on s'y prend bien.

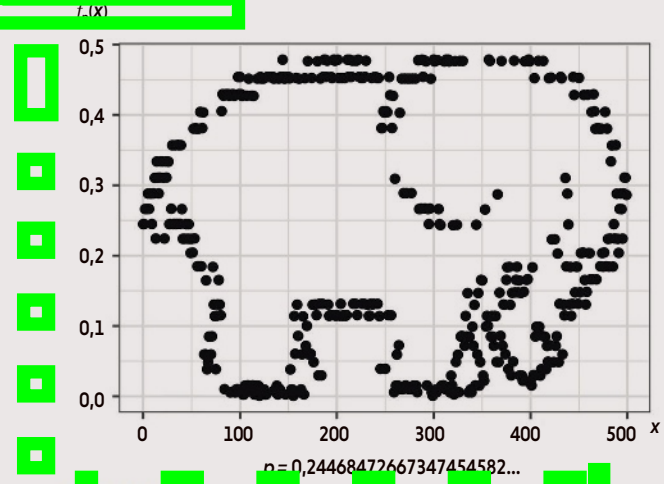
Jean-Paul Delahaye a notamment publié: **Les Mathématiques se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

UN SEUL PARAMÈTRE POUR L'ÉLÉPHANT

Steven Piantadosi a proposé la fonction : $f_p(x) = \sin^2(2^{kx} \arcsin(\sqrt{p}))$ où le nombre réel p est un paramètre, et a montré qu'elle présente une extraordinaire propriété d'ajustement. La valeur de k est fixée une fois pour toutes, et indique la précision avec laquelle on approchera les données. On considère par exemple des valeurs $y_0, y_1, \ldots, y_n$ telles que les points de coordonnées $(0, y_0), (1, y_1), \ldots, (n, y_n)$ dessinent un éléphant, en serrant assez les abscisses et en dessinant des points assez gros.

La méthode de Steven Piantadosi (expliquée dans l'encadré 1) permet alors de déterminer la valeur du paramètre p pour que : $f_p(0) = y_0$, $f_p(1) = y_1$, ..., $f_p(n) = y_n$, autrement dit pour que le graphe de $f_p(x)$ dessine un éléphant. Un seul paramètre suffit pour avoir un éléphant ! Bien sûr, on peut obtenir tous les dessins qu'on veut en changeant la valeur de p.

Laurent Boué a écrit des programmes disponibles sur internet qui permettent le calcul de p pour les dessins souhaités et a fait les calculs pour un oiseau et une tortue *(voir la bibliographie)*.



p = 0,74933466...

p = 0,70704013...

L'énoncé démontré par Steven Piantadosi est le suivant :

- On se fixe une précision e, par exemple 1/1 000, ce qui signifie que l'on recherchera à avoir des égalités avec une erreur inférieure à e.

- Il existe une fonction $f_p(x)$ dépendant d'un paramètre réel p, telle que, quelles que soient les données $y_0, y_1, \ldots, y_n$ en nombre fini, il existe une valeur p du paramètre pour laquelle $f_p(0) = y_0$, $f_p(1) = y_1$, ..., $f_p(n) = y_n$ avec une erreur inférieure à e pour chaque égalité.

En clair, en faisant varier le paramètre p, la fonction $f_p(x)$ s'ajuste avec une précision e à tout jeu de données fixé à l'avance, aussi grand soit-il.

La fonction miraculeuse de Steven Piantadosi est : $f_p(x) = \sin^2(2^{kx} \arcsin(\sqrt{p}))$. Rappelons que $\arcsin(x)$ est la fonction inverse de $\sin(x)$, ce qui signifie que pour tout x compris entre $-\pi/2$ et $\pi/2$, $y = \sin(x) \Leftrightarrow x = \arcsin(y)$.

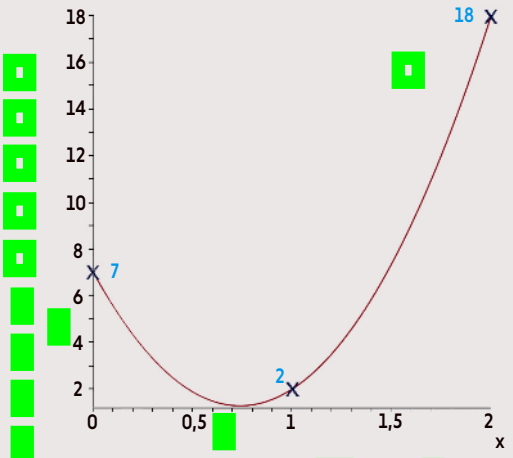
La valeur k qui apparaît dépend de la précision e souhaitée, mais une fois e fixée, k l'est aussi. Bien évidemment, le chercheur a calculé le paramètre p qui donne un éléphant. L'encadré 1 montre le résultat.

D'OÙ VIENT L'EXPLOIT ?

Comprendre en détail comment la fonction $f_p(x)$ réalise cet exploit, et comment s'y prendre pour trouver les bonnes valeurs du paramètre p, est un jeu mathématique qui exige un peu de calcul *(voir les encadrés 3 et 4)*. Cependant, l'idée générale est simple : on va cacher dans le paramètre p qui, parce qu'il est un nombre réel, peut contenir une infinité d'informations, les nombres $y_0, y_1, \ldots, y_n$. Ensuite, la >

© S. T. Piantadosi, AIP Advances, 8, 095118, 2018 (éléphant) - L. Boué, https://arxiv.org/pdf/1904.12320.pdf (oiseau et tortue)

L'INTERPOLATION



Imaginons que l'on veuille trouver un polynôme P(*x*) qui prenne la valeur 7 pour *x* = 0, la valeur 2 pour *x* = 1, et la valeur 18 pour *x* = 2.

Voici une méthode bien connue qui permet d'en trouver un pour un nombre quelconque de données.

On écrit : P(*x*) = 7(*x* − 1)(*x* − 2)/[(0 − 1)(0 − 2)] + 2(*x* − 0)(*x* − 2)/[(1 − 0)(1 − 2)] + 18(*x* − 0)(*x* − 1)/[(2 − 0)(2 − 1)].

Le premier terme est nul pour *x* = 1 et *x* = 2, le second pour *x* = 0 et *x* = 2, le troisième pour *x* = 0 et *x* = 1. Donc, seul le premier terme n'est pas nul pour *x* = 0, seul le second n'est pas nul pour *x* = 1, seul le troisième n'est pas nul pour *x* = 2.

De plus, les facteurs 7, 2 ou 18 au début de chaque terme assurent que le terme non nul pour *x* = 0 prenne la valeur 7, pour *x* = 1 prenne la valeur 2, pour *x* = 2 prenne la valeur 18. C'est ce que l'on recherchait. En développant et en simplifiant, on trouve :

P(*x*) = 21 *x*²/2 −31 *x*/2 + 7.

On vérifie aisément que P(0) = 7, P(1) = 2, P(2) = 18.

La méthode se généralise et permet, si $y_0, y_1, \ldots, y_n$ sont des valeurs données, de construire sans problème un polynôme qui prendra la valeur y_0 pour *x* = 0, y_1 pour *x* = 1, ..., y_n pour *x* = *n*. Telle est la « méthode d'interpolation de Lagrange ».

Elle montre qu'autoriser beaucoup de paramètres, ici les coefficients du polynôme, permet sans mal de faire passer un polynôme par les valeurs souhaitées, quelles qu'elles soient.

Cependant, en général, la fonction trouvée oscillera beaucoup, alors qu'on préférerait une fonction aussi régulière et stable que possible. Son ajustement aux valeurs voulues est exact, mais insatisfaisant. Il existe de meilleures méthodes permettant d'approcher les valeurs voulues en limitant les oscillations de la fonction résultat.

Retenons qu'interpoler exactement est facile, mais que cela ne satisfait pas en général le désir de trouver des lois lisses et régulières.

Cette logique de l'interpolation de Lagrange est poussée jusqu'à l'absurde dans les résultats présentés dans le texte principal : la méthode découverte par Steven Piantadosi, bien plus puissante que l'interpolation de Lagrange, permet, en changeant un seul paramètre *p* d'une fonction $f_p(x)$, d'obtenir que pour des valeurs quelconques $y_0, y_1, \ldots, y_n$, on ait :

$f_p(0) = y_0$, $f_p(1) = y_1$, ..., $f_p(n) = y_n$.

> fonction $f_p(x)$ pour $x = 0, 1, \ldots, n$ les fera remonter une à une : quand x vaudra 0, y_0 remontera, quand x vaudra 1, y_1 remontera, etc.

L'encadré 3 explique que cette remontée des valeurs approchées de y_0, y_1, ..., y_n s'opère indirectement grâce à la fonction $2x$. Quand on applique la fonction $2x$ à un nombre réel écrit en base 2, par exemple $x = 0{,}11001110111111_2$, elle fait remonter tous les chiffres vers la gauche : $2x = 1{,}10011101111_2$ (le 2 en indice indique qu'il s'agit d'une écriture en base 2).

Cette propriété est équivalente, pour la base 2, à ce que l'on connaît bien en base 10 : multiplier par 10 décale toutes les décimales d'un chiffre vers la gauche. Par exemple, 10×3,1415926... = 31,415926...

En utilisant la fonction qui enlève ce qui est devant la virgule, la fonction $(x \bmod 1)$, parfois appelée « partie fractionnaire de *x* », on a alors un moyen de faire remonter les chiffres binaires d'un nombre *x* donné en effaçant ceux qui sont placés en tête. Posons en effet $D(x) = 2x \bmod 1$, et prenons par exemple $x = 0{,}11001110111101011_2$. On a alors :

$D(x) = 0{,}10011101111010_2$,

$D(D(x)) = 0{,}00111011110101_2$,

$D(D(D(x))) = 0{,}01110111101012$, etc.

En exploitant ce moyen de cacher des informations dans un paramètre réel *p*, ainsi que quelques autres astuces (*voir l'encadré 4*), on arrive à la fonction qui, avec le bon choix de *p*, donne y_0 pour $x = 0$, y_1 pour $x = 1$, ..., y_n pour $x = n$ avec une précision fixée à l'avance. Cela montre qu'un seul paramètre *p* et une seule fonction $f_p(x)$ permettent d'approcher toutes les données que l'on veut, quel que soit leur nombre, pourvu qu'il soit fini !

Ainsi, pas besoin de quatre paramètres pour dessiner un éléphant : avec un paramètre unique, on peut s'arranger, et la même fonction servira toujours, en changeant *p*, pour dessiner un poisson, une tortue, un oiseau ou tout ce que l'on veut.

NOMBRE DE PARAMÈTRES ET COMPLEXITÉ DES MODÈLES

On mesure parfois la complexité d'un modèle en comptant le nombre de paramètres utilisés par le modèle. C'est une façon de procéder qui ne peut pas se justifier sans précisions supplémentaires sur la nature du modèle. En effet, la fonction $f_p(x)$ de Steven Piantadosi montre que l'on peut toujours se ramener à un seul paramètre. Si l'on veut donner un sens au décompte des paramètres d'un modèle, il faut détailler les contraintes qu'on impose au modèle, par exemple « ne faire intervenir que des polynômes » ce qui interdira d'accepter la fonction $f_p(x)$ ou l'une de ses variantes.

Il faut insister sur l'idée que l'article de Steven Piantadosi ne prétend nullement

proposer une méthode nouvelle pour construire des modèles approchant des données en utilisant une fonction à un seul paramètre (*voir l'encadré 5*). L'article est seulement un jeu mathématique qui exploite la capacité qu'a un nombre réel de détenir une quantité infinie d'information. Ce qui fait l'intérêt particulier de l'article et le rend étonnant est la simplicité globale de la méthode. Je ne crois pas que l'on ait publié antérieurement au travail de Steven Piantadosi une méthode aussi élémentaire permettant de déterminer et calculer effectivement un paramètre p qui accumule des informations en nombre illimité, et de faire remonter ce qu'on a caché dans p en n'utilisant qu'une seule fonction construite à partir des fonctions élémentaires de l'analyse classique (sin, arcsin, exponentielle, etc.).

Les physiciens utilisent des nombres réels, mais sans jamais prendre en compte plus de 20 ou 30 décimales (*voir l'article de cette rubrique de décembre 2019*). Aussi ne donneront-ils aucun sens à des modèles comme celui suggéré par la fonction prodigieuse de Steven Piantadosi, qui ne fonctionne que si l'on accepte de manipuler des centaines de chiffres significatifs.

Si l'on examine de près la fonction $f_p(x)$ quand le paramètre p a été fixé, on s'aperçoit qu'elle oscille violemment et que les valeurs qu'elle prend aux nombres entiers 0, 1, ..., n ne sont en rien représentatives de ce qui se passe pour les x compris entre 0 et 1, entre 1 et 2, entre 2 et 3, etc.

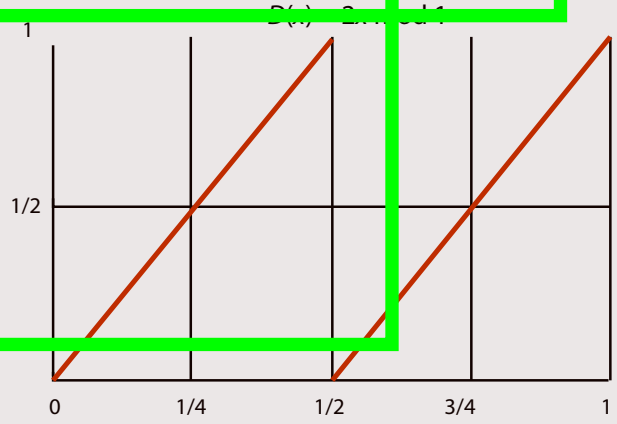
Si l'on dessine (autant qu'on peut le faire) tout le tracé de la fonction $f_p(x)$ entre 0 et n, on ne voit pas du tout l'image que produit le dessin quand on ne retient que les valeurs de $f_p(x)$ pour $x = 0, 1, ..., n$. On voit un zigzag serré qui remplit presque tout le rectangle $[0, n] \times [0, 1]$. Le tracé de la fonction $f_p(x)$ passe bien tout près des points de coordonnées $(0, y_0)$, $(1, y_1)$, ..., (n, y_n), mais il le fait sans limiter ses variations, alors que c'est ce qu'on attend d'une bonne fonction d'interpolation: on désire cette dernière aussi lisse que possible.

Citons les commentaires de Steven Piantadosi concernant sa fonction miraculeuse:

L'existence d'une fonction aussi simple avec une telle liberté de comportement illustre un problème plus fondamental. Elle montre que la complexité d'un modèle ne peut pas être évaluée en comptant ses paramètres.

Plus généralement, l'utilisation non critique d'une approche par dénombrement de paramètres ignore qu'un seul paramètre à valeur réelle contient potentiellement une quantité illimitée d'informations puisque, pour spécifier entièrement un nombre réel, un nombre infini de bits doit être, ce qui d'ailleurs est en soi problématique. Un autre fait notable est que l'ensemble des nombres réels >

3. UNE PREMIÈRE FONCTION MIRACULEUSE



Soit D la fonction telle que $D(x) = 2x$ pour $0 < x < 1/2$ et $D(x) = 2x - 1$ pour $1/2 \leq x < 1$. Cela peut s'écrire : $D(x) = 2x \bmod 1$.

Elle est appelée parfois partie fractionnaire de x, car elle ne garde que ce qui est après la virgule : 2,37 devient 0,37 ; 219,2222 devient 0,2222.

Appliquée à un nombre écrit en binaire, par exemple $x = 0,1101111012$, la fonction $D(x)$ donne un nombre ayant le même développement binaire que x, sauf que le premier chiffre après la virgule a disparu : $D(0,1101111012) = 0,1011110_2$. L'explication est simple. D'une part, $2x$ décale le développement binaire d'un chiffre vers la gauche (c'est comme en base 10 quand on multiplie un nombre par 10) et donc $0,1101111012$ devient $1,1011110_2$; d'autre part, $2x \bmod 1$ enlève le 1 devant la virgule s'il y en a un.

Considérons maintenant la fonction D^k obtenue en appliquant k fois de suite la fonction D : $D^k(x) = D(D(...(D(x))...))$, k fois. La fonction $D^k(x)$ fait glisser les chiffres binaires de x de k places vers la gauche et élimine les k premiers chiffres : $D^k(x) = 2^k x \bmod 1$. Par exemple, $D^4(0,1101111012) = 0,11101_2$.

Soient des nombres $y_0, y_1, ..., y_n$ compris entre 0 et 1, chacun écrit en base 2 avec r chiffres après la virgule. Exemple pour $r = 5$ et $n = 2$:
$y_0 = 0,10111_2$; $y_1 = 0,11001_2$;
$y_2 = 0,01011_2$
Soit $p = 0,1011111001010112$ obtenu en mettant les uns derrière les autres les chiffres de y_0, y_1 et y_2.
On a :
$p = D^0(p) = 0,1011111001010112$
$D^1(p) = 0,0111110010101112$
$D^2(p) = 0,1111100101011_2$
$D^3(p) = 0,1111001010112$
$D^4(p) = 0,111001010112$
$D^5(p) = 0,1100101011_2$, etc.
Ainsi, $D^0(p)$ correspond à y_0 sur les 5 premiers chiffres binaires, $D^5(p)$ correspond à y_1 sur les 5 premiers chiffres binaires, $D^{10}(p)$ correspond à y_2 sur les 5 premiers chiffres binaires, etc.

Ce procédé place donc dans les chiffres binaires de p les chiffres binaires des données y_0, y_1,..., y_n avec une précision de r chiffres binaires pour chacun, ce qui permet, en appliquant r fois de suite la fonction D, d'avoir successivement y_0, y_1,..., y_n, à chaque fois avec une précision de r chiffres binaires.

En résumé, p contient, cachés dans ses chiffres binaires, les nombres $y_0, y_1, ..., y_n$ avec une précision de r chiffres binaires pour chacun, et la fonction D, appliquée de manière répétée à p, retrouve ces nombres cachés.

Soit maintenant la fonction E_p définie par $E_p(x) = D^{rx}(p)$, dont la variable est x et qui dépend du paramètre p. On a :
$E_p(0) = y_0$ avec une précision de r chiffres binaires,
$E_p(1) = y_1$ avec une précision de r chiffres binaires,...,
$E_p(n) = y_n$ avec une précision de r chiffres binaires.

En choisissant bien le paramètre p, la fonction $E_p(x)$ est donc capable de redonner les nombres $y_0, y_1, ..., y_n$ avec une précision de r chiffres binaires. Si les données ne sont pas comprises entre 0 et 1, on y ramène en divisant tout par un nombre assez grand.

Ainsi, en ajustant bien son paramètre p, la fonction $E_p(x)$ suffit pour retrouver tout jeu fini de données. Ce n'est pas le résultat annoncé concernant la fonction $f_p(x) = \sin^2(2^{kx} \arcsin(\sqrt{p}))$, mais nous y sommes presque. L'encadré 4 explique comment y parvenir.

LA FONCTION DE PIANTADOSI

Compte tenu de ce qui a été dit dans l'encadré 3 sur la fonction D, on considère à présent trois

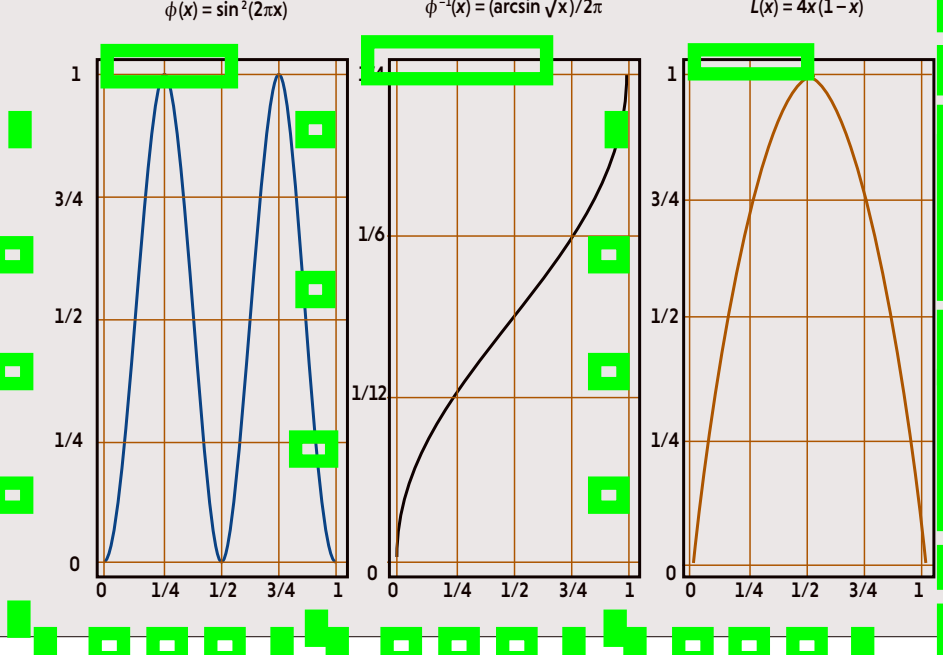
$\phi(x) = \sin^2(2\pi x)$;
$\phi^{-1}(x) = (\arcsin\sqrt{x})/2\pi$;
$L(x) = 4x\,(1 - x)$.
Par définition, $\phi(\phi^{-1}(x)) = x$ pour $0 \leq x \leq 1$ et $\phi^{-1}(\phi(x)) = x$ pour $0 \leq x \leq 1/4$.
Voici des calculs inévitable pour arriver au miracl.
$\phi(D(x)) = \phi(2x) = \sin^2(4x) = 4\sin^2(2\pi x)\,(1 - \sin^2(2\pi x)) = L(\phi(x))$ (on a utilisé $\sin(2a) = 2\sin a \cos a$, $\cos^2 a = 1 - \sin^2 a$ et $\sin(x + 2\pi) = \sin(x)$).
En prenant $x = \phi^{-1}(p)$, soit $p = \phi(x)$, on a :
$\phi(D(\phi^{-1}(p))) = L(p)$,
d'où l'on déduit :
$\phi(D^k(\phi^{-1}(p))) = L^k(p)$.

Autrement dit, pour connaître l'effet de L ffit d'appliquer ϕ^{-1} à p, puis d'appliquer k fois D, puis d'appliquer ϕ au résultat.

Nous allons maintenant comprendre quel ur que $f_p(x)$, définie $y_0, y_1, \ldots, y_n$ pour $x = 0, 1, \ldots, n$. On note d'abord que $f_p(x) = \sin^2(2^{kx} \arcsin\sqrt{p})$ $= \phi(D^{kx}(\phi^{-1}(p))) = L^{kx}(p)$.
Si l'on veut que $f_p(x)$ donne approximativement $y_0, y_1, \ldots, y_n$ pour $x = 0, 1, \ldots, n$, il suffit donc que $D^{kx}(\phi^{-1}(p))$ donne approximativement $\phi^{-1}(y_0)$, $\phi^{-1}(y_1), \ldots, \phi^{-1}(y_n)$ pour $x = 0, 1, \ldots, n$. D'après l'encadré 3, il suffit donc que $\phi^{-1}(p)$ soit fait de k chiffres binaires de $\phi^{-1}(y_0)$, suivi de k chiffres binaires de $\phi^{-1}(y_1)$, ..., suivi de k chiffres binaires de $\phi^{-1}(y_n)$.

Conclusion : le paramètre p que nous cherchons est l'image par ϕ de k chiffres binaires de $\phi^{-1}(y_0)$, suivi de k chiffres binaires de $\phi^{-1}(y_1)$, ..., suivi de k chiffres binaires de $\phi^{-1}(y_n)$. Plus k sera grand, plus les y_i seront donnés avec précision par $f_p(0)$, $f_p(1)$, ..., $f_p(n)$.

Prenons par exemple $y_0 = 0{,}7$, $y_1 = 0{,}4$, $y_2 = 0{,}5$ et $k = 12$. On calcule $\phi^{-1}(0{,}7)$, $\phi^{-1}(0{,}4)$ et $\phi^{-1}(0{,}5)$ avec 12 chiffres binaires significatifs :
$\phi^{-1}(0{,}7) = 0{,}001010000101_2$;
$\phi^{-1}(0{,}4) = 0{,}000110111111_2$;
$\phi^{-1}(0{,}5) = 0{,}001000000000_2$.
On met les chiffres binaires trouvés les uns derrière les autres :
$q = 0{,}001010000110000110111110001000000000_2 = 0{,}157741434872150421112578$.
On calcule $p = \phi(q) = 0{,}6999652447\ldots$ et on a bien ce qui est attendu :
$f_p(0) = 0{,}6999652447$, soit environ 0,7,
$f_p(1) = 0{,}3996355201$, soit environ 0,4,
$f_p(2) = 0{,}4999999999$, soit environ 0,5.



> *qui peuvent être décrits avec un nombre fini de bits (par exemple en les faisant produire par une machine de Turing) est dénombrable. Cet ensemble de nombres réels a donc une mesure nulle dans l'ensemble de tous les nombres réels. On sait aussi qu'il existe des fonctions injectives (c'est-à-dire ne prenant pas deux fois la même valeur) de $\mathbb{R}^n$ (l'espace de dimension n) vers $\mathbb{R}$. Cela confirme que le nombre de paramètres dans un modèle ne peut pas être une mesure raisonnable de sa complexité.*

UNIVERSALITÉ

La fonction $f_p(x) = \sin^2(2^{kx}\arcsin(\sqrt{p}))$ [illegible] elle s'adapte à toute série de données $y_0, y_1, \ldots, y_n$. Ce n'est pas le premier objet universel que l'on rencontre en mathématiques.

Le plus simple est sans doute le nombre π. On conjecture que c'est un nombre-univers et le calcul de plusieurs milliers de milliards de ses décimales le confirme : chaque séquence possible de chiffres décimaux (par exemple 243, 21145 ou 929292), aussi longue qu'on veut, apparaîtrait ainsi dans son développement décimal. Si π est réellement un nombre-univers, on peut le voir comme une fonction qui, quand on fixe un entier n, affiche par exemple 1 million de chiffres décimaux à partir de la n-ième décimale. Avec ce million de chiffres, on peut dessiner une image de 1 000 × 1 000 pixels avec 10 niveaux de gris. Si π est un nombre univers, alors pour chaque image de ce format, votre portrait par exemple, il existe au moins un entier n tel que l'image numéro n tirée de π la produise. En ce sens, π serait au moins aussi universel que $f_p(x)$, puisque capable de produire toutes les images du format indiqué.

Cependant, la fonction prodigieuse de Piantadosi a un double avantage sur π :

(a) on est certain qu'elle est universelle, ce n'est pas une conjecture ;

(b) on sait calculer la valeur du paramètre p nécessaire pour obtenir des données $y_0, y_1, \ldots, y_n$, et ce calcul est faisable, ce qui n'est pas le cas pour le n donnant votre portrait dans π.

UN AUTRE OBJET UNIVERSEL : LA FONCTION ZÊTA DE RIEMANN

Un autre objet universel totalement inattendu a été rencontré en mathématiques en 1975 par le mathématicien russe Sergei Voronin (*voir la bibliographie*). Il concerne la célèbre fonction zêta de Riemann.

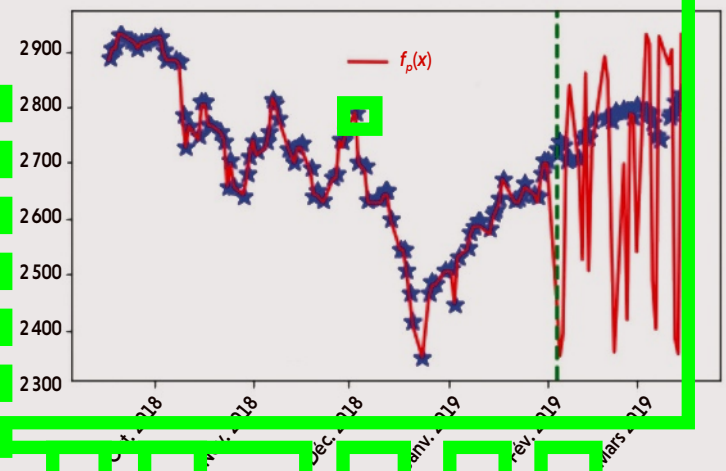
Cette fonction notée $\zeta(s)$ est définie, pour tout nombre réel $s > 1$, par la formule :

$\zeta(s) = 1 + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s + \ldots$

On peut lui donner un sens pour toutes les valeurs de s, y compris quand s est un nombre complexe (sauf en $s = 1$). On peut la voir

L'ILLUSION DÉÇUE DU SURAJUSTEMENT

5



Laurent Boué a pris 95 valeurs de l'indice boursier américain S&P 500. Il a calculé la valeur [illegible] qui permet à la fonction mirifique de Piantadosi, $f_p(x) = \sin^2(2^{kx} \arcsin(\sqrt{p}))$, de redonner ces valeurs.
Il a ensuite regardé ce que cela donnait pour les valeurs suivantes de l'indice (au-delà de la barre verticale pointillée verte).

Si la méthode d'approximation par $f_p(x)$ était une bonne façon de découvrir une loi cachée dans les variations de cet indice boursier, les valeurs suivantes pour le p calculé auraient été proches de celles des données réelles.

Sans surprise, ce n'est pas du tout le cas. Sur le dessin, la courbe rouge est ce que donne $f_p(x)$ et les points bleus sont les valeurs réelles. La fonction $f_p(x)$ permet bien, en changeant p, de s'ajuster à tout ensemble de données, mais ce n'est en rien un moyen pour découvrir des lois cachées. C'est un exemple parfait de surajustement inutile.

comme une fonction qui, à tout point du plan (les nombres complexes sont assimilables à des points du plan), associe un autre point du plan. Cette fonction joue un rôle central en théorie des nombres et, en particulier, la position des valeurs de s qui l'annulent est liée à la répartition des nombres premiers.

Quand on considère des fonctions de ce type, qui produisent des nombres complexes à partir de nombres complexes, les fonctions jouant le rôle des fonctions dérivables sont les « fonctions holomorphes ». Les fonctions usuelles comme x^n, $\sin(x)$, $\cos(x)$, $\log(x)$ et toutes celles que l'on obtient en les combinant sont bien sûr holomorphes.

Dans la partie du plan correspondant à une bande verticale B des points de coordonnées (x, y) avec $1/2<x<1$, Sergei Voronin a démontré une incroyable propriété d'universalité de $\zeta(s)$. Pour toute partie P de cette bande sans trou et compacte (c'est-à-dire de taille finie, et qui contient la limite de toutes ses suites convergentes), et pour toute fonction holomorphe f qui ne s'annule pas dans P, il existe un nombre réel r tel que $\zeta(s+r)$ prend les mêmes valeurs dans P que f, à e près, e, comme précédemment, est une précision que l'on fixe une fois pour toutes).

Dit autrement : quelle que soit la fonction holomorphe f définie sur une zone P sans trou de la bande B, la fonction ζ prend presque les mêmes valeurs que f quand on examine ses valeurs dans une version décalée vers le haut de P. C'est un peu comme si $\zeta(s)$, à elle seule, pouvait imiter toutes les fonctions holomorphes ! Dans π, il y a sans doute toutes les suites finies de décimales, mais dans $\zeta(s)$, on est certain qu'il y a toutes les fonctions holomorphes ! Précisons que le résultat de Sergei Voronin a été étendu à d'autres fonctions que la fonction $\zeta(s)$.

Un autre objet universel fascinant a déjà été évoqué dans cette rubrique, le graphe universel de Rado (voir *Pour la Science* de novembre 2018). Ce graphe infini contient en effet comme sous-graphes tous les graphes finis, et tous les graphes infinis ; de plus, il a la propriété que quand on en enlève une partie finie, ce qui reste est identique à ce dont on est parti.

Le monde infini des mathématiques recèle des merveilles et procure des étonnements bien au-delà, du moins c'est mon point de vue de mathématicien, de tout ce qu'on peut trouver dans le monde physique qui, en comparaison, apparaît parfois terne et ennuyeux ! ■

BIBLIOGRAPHIE

Interpolation lagrangienne, Wikipédia, 2020.

Zeta function universality, Wikipedia, 2020.

L. Boué, **Real numbers, data science and chaos : How to fit any dataset with a single parameter**, prépublication arXiv:1904.12320, 2019.

L. Boué, **Programmes pour « Real numbers, data science and chaos : How to fit any dataset with a single parameter »**, 2019 : https://github.com/Rmlot/single-parameter-fit

C. Zhang *et al.*, **A study on overfitting in deep reinforcement learning**, prépublication arXiv:1804.06893, 2018.

S. T. Piantadosi, **One parameter is always enough**, *AIP Advances*, vol. 8(9), 095118, 2018 (https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5031956).

J. Mayer *et al.*, **Drawing an elephant with four complex parameters**, *American Journal of Physics*, vol. 78, pp. 648-649, 2010.

S. Voronin, **Theorem on the "universality" of the Riemann zeta-function**, *Math. USSR Izv.*, vol. 9, pp. 443-445, 1975.

© L. Boué, https://arxiv.org/pdf/1904.12320.pdf

LES AUTEURS

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

LES MASQUES DÉMASQUÉS

En pleine pandémie de Covid-19, l'intérêt pour les masques respiratoires a bondi, alors même qu'ils sont en usage depuis longtemps. Mais comment fonctionnent-ils?

Norme FFP2, masque chirurgical ou encore masque fabriqué maison… Ces mots ont envahi notre quotidien avec la pandémie de Covid-19. En tant que physiciens, il ne nous appartient pas de donner des recommandations sur l'usage de ces protections pour minimiser les risques de contamination. En revanche, nous pouvons nous intéresser aux mécanismes physiques mis en œuvre dans leur fonctionnement. On pourrait croire que les masques agissent, pour l'essentiel, comme des tamis. Or ce n'est pas du tout le cas!

FILTRER LES AÉROSOLS

En toussant, en éternuant, en parlant ou tout simplement en respirant, nous produisons des aérosols: autrement dit, nous émettons dans l'air expiré des particules de tailles diverses. Ce sont typiquement des gouttelettes d'eau de diamètre compris entre 1 micromètre (un millième de millimètre) et 100 micromètres, qui s'évaporent rapidement et libèrent dans l'air bactéries (0,5 à 5 micromètres) et virus (0,02 à 0,3 micromètre, 0,1 micromètre pour le virus SARS-CoV-2, responsable du Covid-19).

Les particules les plus grosses tombent rapidement au sol. Les plus légères, en revanche, restent en suspension. Dans de l'air calme, la durée de sédimentation sur une hauteur de 3 mètres est en effet de 4 minutes pour des particules de 20 micromètres de diamètre, et cette durée est multipliée par 4 à chaque fois que l'on divise la taille par 2: elle dépasse déjà 1 heure pour des particules de 5 micromètres.

En situation épidémique, on peut filtrer l'air à l'aide d'un masque pour protéger notre système respiratoire de ces aérosols chargés de pathogènes. Le premier effet filtrant auquel on songe est l'effet de tamis: comme dans une passoire, ne pourraient traverser le masque que les particules dont la taille est inférieure à celle des trous. Il y a cependant une difficulté majeure: plus les trous sont petits, mieux on filtre mais plus il est difficile de respirer à travers. Si l'on veut que le masque soit utilisable sans assistance mécanique, un filtre à trous submicrométriques, qui seraient nécessaires pour tamiser bactéries et virus, est exclu.

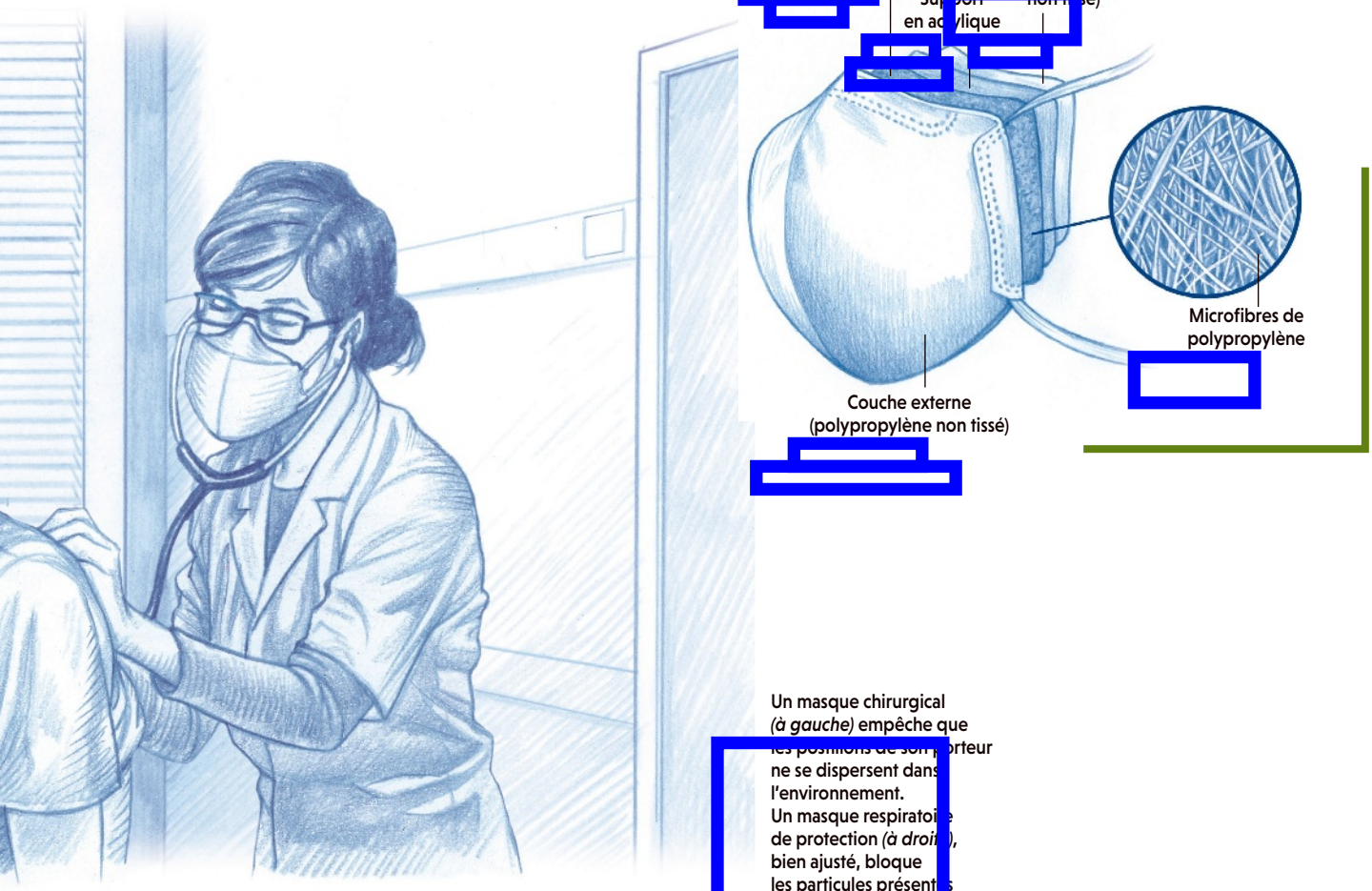
Heureusement, d'autres mécanismes sont à l'œuvre et permettent de piéger des particules de toutes tailles dans le masque. Ce dernier comporte en général une couche, un peu épaisse, composée de fibres non tissées, mais plutôt entrelacées (*voir l'encadré page ci-contre*). Lorsqu'une particule, entraînée par l'air qui traverse le filtre, vient percuter une fibre, elle s'y colle durablement grâce aux forces intermoléculaires dites «de Van der Waals». Il faut donc comprendre d'où résultent les collisions particule-fibre.

Aux échelles considérées, on montre que l'écoulement de l'air est dominé par les effets de viscosité et qu'il est

© Illustrations de Bruno Vacaro ; Schéma du masque d'après S. S. Zhou et al., J. Thorac. Dis., vol.10(3), pp. 2059-2069, 2018

PROTECTION RESPIRATOIRE

Un masque censé protéger contre les particules pathogènes présentes dans l'air que l'on inspire doit comporter des couches filtrantes suffisamment épaisses. Il faut de plus qu'il s'ajuste bien au visage, afin que l'air ne puisse pas s'introduire par les côtés (ce qui se produit avec un simple masque chirurgical). En particulier, si le porteur est un homme, il faut qu'il soit rasé. Ces masques peuvent être portés quelques heures au plus, puis sont à jeter.



Un masque chirurgical *(à gauche)* empêche que les positions de son porteur ne se dispersent dans l'environnement. Un masque respiratoire de protection *(à droite)*, bien ajusté, bloque les particules présentes dans l'air inspiré.

laminaire : en arrivant à proximité d'une fibre, les lignes de courant de l'air régulières, se séparent pour contourner la fibre, puis se rejoignent derrière. Les particules entraînées par l'air suivent, en première approximation, ces lignes de courant.

Si la distance séparant la fibre de la ligne de courant qui porte la particule est inférieure au rayon de celle-ci, la particule percute la fibre et se colle sur elle : c'est l'effet d'interception, d'autant plus important que la particule est grosse *(voir l'encadré page 66)*.

Mais les particules ne suivent pas toujours exactement les lignes de courant. Il en est ainsi des grosses particules, qui sont de l'inertie due à leur masse : comme une voiture trop rapide dans un virage, au lieu de contourner avec l'air une fibre, elles vont continuer « tout droit » et la percuter. C'est l'effet d'inertie.

Quant aux petites particules, elles sont sujettes au mouvement brownien, dû aux impacts incessants avec les molécules de l'air, en agitation thermique : leurs trajectoires sont erratiques et se jouent des lignes de courant. Lorsqu'une telle particule passe à proximité d'une fibre, elle peut diffuser jusqu'à elle et s'y coller. Contrairement à l'effet d'inertie, cet effet de capture par diffusion est d'autant plus important que la particule est petite et que l'écoulement est lent.

À ces effets s'ajoutent éventuellement des captures électrostatiques lorsque la particule est électriquement chargée. Quand on fait le bilan, on s'aperçoit que l'efficacité du filtre est moindre pour les particules de tailles intermédiaires *(voir le graphique de l'encadré page 66)*.

En pratique, la partie filtrante des masques est généralement constituée de >

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

> fibres en polypropylène d'un diamètre de l'ordre de 5 micromètres et formant des pores de tailles variant entre 10 et 20 micromètres, bien supérieures aux tailles des virus et des bactéries. L'efficacité du filtrage est donc assurée par l'épaisseur du filtre: plus il est épais, plus les événements de capture décrits plus haut se multiplient et moins de particules passent.

Un filtrage efficace a cependant deux conséquences: d'une part, la respiration devient plus difficile; d'autre part, si le masque n'est pas parfaitement ajusté au visage, l'air s'introduit par les interstices entre le masque et le visage. La conséquence est que le choix du «bon masque» résulte nécessairement d'un compromis entre diverses exigences: qualité du filtrage, facilité d'utilisation et confort de l'utilisateur.

MASQUES CHIRURGICAUX ET MASQUES FFP2

On distingue deux types de dispositifs. Il y a d'abord les «masques chirurgicaux». Leur objectif principal est d'éviter que les grosses particules émises par celui qui le porte, comme les postillons, se dispersent dans l'environnement. L'efficacité pour filtrer les petites particules en suspension dans l'air n'est pas recherchée: elle est, de fait, très mauvaise.

On réalise des tests standardisés en mesurant quel est le pourcentage de particules de 0,06 micromètre (la taille d'un virus) qui passent à travers le masque lorsqu'on fixe le débit d'air à 85 litres par minute, caractéristique d'une respiration très précipitée. Avec des masques chirurgicaux, on obtient des taux très variables, compris entre 4% et 90%, en raison du passage de l'air par les bords du masque. Un tel masque est peu satisfaisant en cas de contacts prolongés avec des malades, mais utile sinon, car il bloque les postillons dans les deux sens et permet d'éviter de se toucher le visage avec les mains.

Une seconde classe de masques est constituée des «respirateurs de protection». Ce sont eux dont on entend le plus parler aujourd'hui: ils sont notés FFP (pour *filtering facepiece*, «pièce faciale filtrante»), avec un numéro qui indique le degré de filtrage. Ces masques respirateurs sont conçus pour filtrer l'air et réduire le nombre de particules et de germes que le porteur inhale.

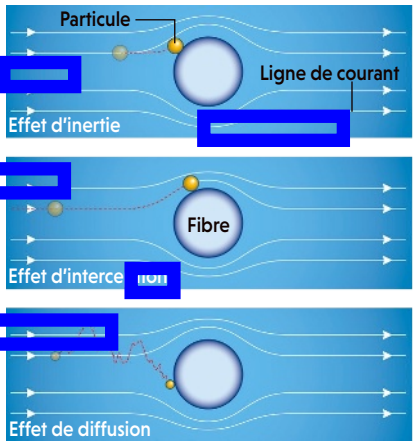
Le masque FFP2 doit par exemple filtrer au moins 94 % (pour un FFP3, 99 %) d'un aérosol contenant des particules de diamètre médian égal à 0,06 micromètre et avoir des fuites totales de l'extérieur vers l'intérieur (filtrage et étanchéité des joints faciaux compris) inférieures à 8 % (pour un FFP3, 2 %) de l'air inspiré. Cela requiert que les respirateurs doivent être parfaitement ajustés sur le visage, en général avec deux élastiques autour de la tête et un clip au niveau du nez.

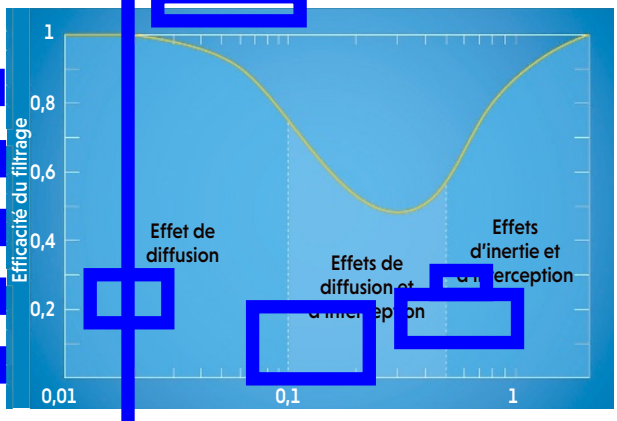
FILTRAGE EFFICACE, RESPIRATION DIFFICILE

Comme les masques sont ajustés et épais afin de filtrer l'air, ils offrent une résistance au passage de l'air, que l'on mesure en évaluant la surpression qu'il faut pour assurer l'écoulement: elle est de l'ordre de 2 millibars pour un masque FFP2 avec une respiration précipitée. Cela semble peu, mais c'est du même ordre de grandeur que les variations de pression mises en jeu dans nos poumons. Aussi, le port prolongé du masque en situation de stress peut entraîner des maux de tête. C'est pourquoi certains sont équipés de soupapes respiratoires qui facilitent l'expiration. ■

MÉCANISMES DE FILTRATION

Trois principaux mécanismes sont à l'œuvre dans les couches filtrantes des masques. Dans l'effet d'inertie, la particule considérée suit une ligne de courant de l'air mais, par sa masse, quitte cette ligne en continuant tout droit et vient se coller à la fibre. Dans l'effet d'interception, la particule suit une ligne de courant et entre au contact d'une fibre si son rayon est plus grand que la distance entre la fibre et la ligne de courant. Dans l'effet de diffusion, la particule suit une trajectoire erratique, due au mouvement brownien, qui l'amène jusqu'à une fibre ; cet effet ne concerne que les particules suffisamment petites. Ces différents effets ont pour conséquence que l'efficacité de la filtration est maximale pour des particules de petite ou grosse taille, et moins bonne pour les particules de taille intermédiaire.





BIBLIOGRAPHIE

C. Bi[illegible], Overview of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation, *Sustainable Cities and Society*, vol. 32, pp. 375-396, 2017.

H. P. Lee et D. Y. Wang, **Objective assessment of increase in breathing resistance of N95 respirators on human subjects,** *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 55(8), pp. 917-921, 2011.

J. Vendel *et al.*, **Lessons learnt over 50 years of air filtration in the nuclear industry,** *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 170, 012026, 2009.

© Bruno Vacaro, d'après J. Vendel et al., Journal of Physics : Conference Series, vol. 170, 012026, 2009

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique** PAG20STD

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

☐ **PAPIER** — 4,90€ PAR MOIS -29 %
- 12 n° du magazine papier

CODE : PV4E90

☐ **PAPIER + HORS-SÉRIE** — 6,50€ PAR MOIS -31 %
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

CODE : PV6E50

☐ **INTÉGRALE** — 8,20€ PAR MOIS -43 %
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

CODE : PV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

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

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour [illegible] 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.

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Désignation du compte à débiter

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

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

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

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

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et 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 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-données-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment le 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-données@pourlascience.fr.

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

L'AUTEUR

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

COMMENT LES OISEAUX CHANTEURS ONT CONQUIS LE MONDE

Il y a quelque 23 millions d'années, les oiseaux chanteurs ont connu une extraordinaire diversification. Leur secret? Une heureuse coïncidence…

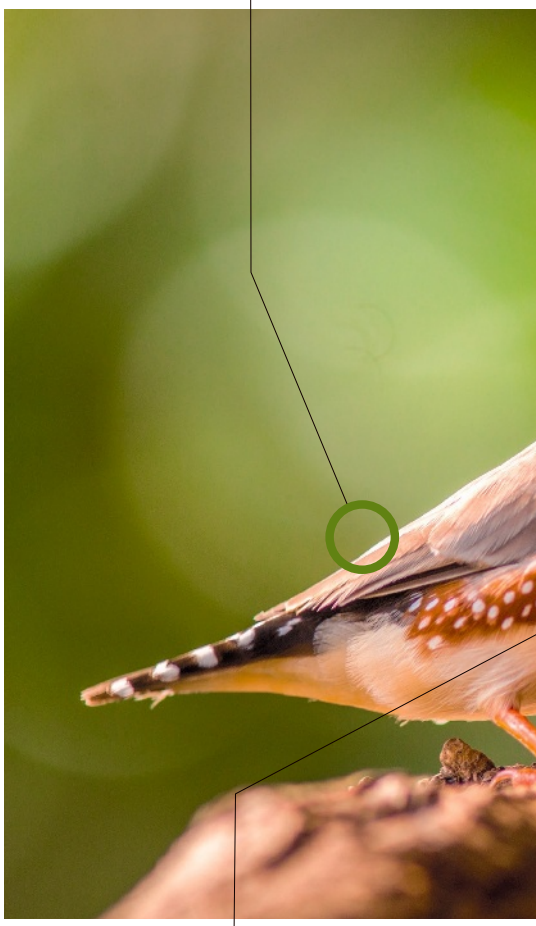
Tri tri tri… Le tyran tritri porte bien son nom: le cri de ce petit oiseau des champs canadiens ressemble à une salve de coups de sifflet. Et pour cause. Comme le batara rayé, le mérulaxe des Andes et les autres oiseaux du groupe des suboscines ou tyranni, son organe vocal – la syrinx – ne compte que deux ou trois paires de muscles, ce qui ne permet que des sonorités de cloche, de coups de marteau, de scie… ou de sifflet. Les oscines, groupe frère des suboscines comportant merles, corbeaux, fauvettes, sittelles, mésanges et bien d'autres, en arborent en revanche de quatre à neuf, ce qui rend leur chant bien plus mélodieux, d'où leur surnom d'oiseaux chanteurs.

Ce n'est pas la seule particularité des oscines. Ce clade avien parmi les plus récents a connu une extraordinaire diversification, à tel point qu'avec celui des suboscines, ils regroupent les deux tiers des oiseaux actuels et sont présents sur tout le globe (sauf l'Antarctique). Cette diversification très rapide a longtemps constitué une énigme pour les biologistes, mais celle-ci commence à être résolue. La clé se trouve dans une heureuse coïncidence entre un phénomène géologique majeur et une curiosité génétique…

UNE ORIGINE GONDWANIENNE

Les oiseaux sont des dinosaures qui ont survécu à l'extinction de masse de la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années. Les rares survivants se sont diversifiés au début du Tertiaire, pour exploser au Miocène (il y a entre 23 et 5 millions d'années). La phylogénie du clade indique clairement l'existence de quelques rares groupes (autruches, oies, faisans…) qui se sont diversifiés dès avant du Jurassique, il y a environ 145 millions d'années. Puis une première grande diversification, au début du Tertiaire, a donné naissance à des oiseaux bien connus: flamants, pigeons, martinets, coucous, grues, goélands, manchots, vautours, hiboux, faucons… Mais ce n'est que bien plus tard, au Miocène, que le groupe rassemblant oscines, suboscines et la famille des acanthisittidés (trois espèces) – les passériformes – a explosé.

Les diamants mandarins vivent principalement en Australie.



L'organe vocal de cet oiseau chanteur, la syrinx, compte neuf paires de muscles. La syrinx s'est complexifiée au fil de l'évolution des oiseaux. Elle est bien plus simple chez les premiers clades à avoir émergé, comme celui des oies et des canards… Le cri de ces oiseaux aussi.

© Jurra8 / Shutterstock.com

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

EN CHIFFRES

10 500

On connaît environ 10 500 espèces d[illegible]oiseaux actuels. Parmi eux, 5 000 sont des o[illegible]cines [illegible]cines et 5 des acanthisittidés.

10 %

[illegible]e chromosome B du diam[illegible]ant mandarin [illegible]st le plus grand de son g[illegible]nome, dont [illegible] il compo[illegible]e au moins 115 gènes, qui sont tous des [illegible]opies de gènes portés sur les autre[illegible] chromosomes.

6

Les gène[illegible] du ch[illegible]mosome B du diamant mandarin s[illegible]nt arr[illegible]és en au moins 6 vagues [illegible] par des spéciat[illegible]ns : 2 gènes il y a 26 millions d'anné[illegible], [illegible] millions d'années, [illegible] millions d'années, [illegible] millions d'années, [illegible] millions d'années... et 20 il y a 1 million d'ann[illegible]s.

Joues orange, poitrine zébrée, flancs roux tachetés de blanc : ce diamant mandarin [illegible] est un mâle. La femelle ne présente aucune de ces caractéristiques.

Les diamants mandarins choisissent leur partenaire pour la vie. Le mâle apporte à la femelle tout le matériel nécessaire pour fabriquer leur nid, mais c'est elle qui décide de son emplacement et le construit. Tous deux s'occuperont des œufs, puis des petits.

Diamant mandarin
(Taeniopygia guttata)
[illegible]

La structure de son arbre est très parlante. En 2003, dans un travail pionnier, l'équipe de Janette Norman, de l'université d'Oxford, avait reconstruit cet arbre en utilisant pour la première fois des séquences d'ADN d'acanthisittidés. Un travail publié en 2010 par l'équipe de Rafe Brown, de l'université du Kansas, et réalisé avec bien plus d'ampleur a confirmé et précisé cette structure, qui se révèle fortement dépendante de la biogéographie.

Le premier groupe qui a émergé est celui des acanthisittidés, endémiques de Nouvelle-Zélande. Puis les suboscines et les oscines se sont séparés. Les suboscines sont constitués de deux groupes : l'un, majoritaire, peuple l'Amérique du Sud (et un peu l'Amérique du Nord), l'autre, l'Afrique (et un peu l'Asie du Sud-Est). Du côté des oscines, les deux premiers clades basaux à émerger – les ménuridés (oiseau-lyre) et les méliphagoidés (méliphages) – comprennent des espèces exclusivement australiennes. Dans le troisième clade, les corvoïdés, on retrouve par ailleurs de nombreuses familles exclusivement d'Australie ou de Nouvelle-Guinée, comme les oiseaux de paradis, mais aussi certaines à large distribution, comme les corvidés (corbeaux, geais…). Puis ont émergé les passéridés, mondialisés.

L'interprétation de cette biogéographie est simple lorsqu'on sait qu'à partir du Jurassique supérieur (il y a 160 millions d'années), le continent du Gondwana s'est disloqué, individualisant, entre autres : l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Australie et la Nouvelle-Zélande. Il apparaît donc que l'ensemble des passériformes sont d'origine gondwanienne, les dichotomies entre groupes ayant suivi la séparation des continents (*voir l'encadré page 70*).

Le premier facteur est donc géologique : entraînée vers le nord par la tectonique des plaques, l'Australie a heurté l'Asie du Sud-Est, provoquant tout d'abord, il y a 23 millions d'années, la >

> formation de la Wallacea, une zone constituée principalement des actuelles petites îles de la Sonde, de Sulawesi (anciennement Célèbes) et de la majorité des Moluques, puis, il y a 15 millions d'années, l'émergence de la Nouvelle-Guinée. Ces événements géologiques ont donné lieu à un corridor autorisant le passage d'animaux volants vers le continent asiatique, puis vers l'ensemble du monde. Or la datation fine des deux vagues de diversification des oscines, réalisée par l'équipe de Rafe Brown, coïncide avec celle des formations de la Wallacea et de la Nouvelle-Guinée, calculée par les géologues.

L'ORIGINALITÉ GÉNÉTIQUE DES OSCINES

Le second facteur de la diversification des oscines est en revanche minuscule. Dès 1998, Maria Pigozzi et Alberto Solari, de l'université de Buenos Aires, ont découvert qu'un oscine, le diamant mandarin (*Taeniopygia guttata*), possède dans son génome un chromosome surnuméraire – appelé chromosome B. Celui-ci ne se comporte pas comme les chromosomes classiques lors des divisions cellulaires, en particulier lors de la méiose, au cours de laquelle il ne s'apparie pas avec un chromosome homologue. Ainsi, les gènes qu'il porte n'obéissent pas aux lois de Mendel. Plusieurs milliers d'espèces animales, végétales ou fongiques présentent de tels éléments. Habituellement, un tel chromosome ne confère aucun avantage à l'organisme qui l'abrite et est donc considéré comme un élément parasite, égoïste, qui utilise la machinerie cellulaire pour se maintenir et se propager.

Or de très récents travaux de l'équipe de Pavel Borodin, de l'Académie russe des sciences, montrent à présent que tous les oscines portent un chromosome B et que celui-ci a un comportement surprenant. On ne le détecte que dans les cellules germinales, et il disparaît de la lignée germinale mâle durant la maturation des spermatozoïdes. De plus, transmis par les femelles, il paraît enrichi en gènes impliqués dans la maturation des ovocytes. Il serait donc devenu indispensable. Suivant les espèces, ces chromosomes B varient énormément en taille et montrent de faibles similarités interspécifiques. En fait, chez les oiseaux, de parasite, le chromosome B est devenu symbiote.

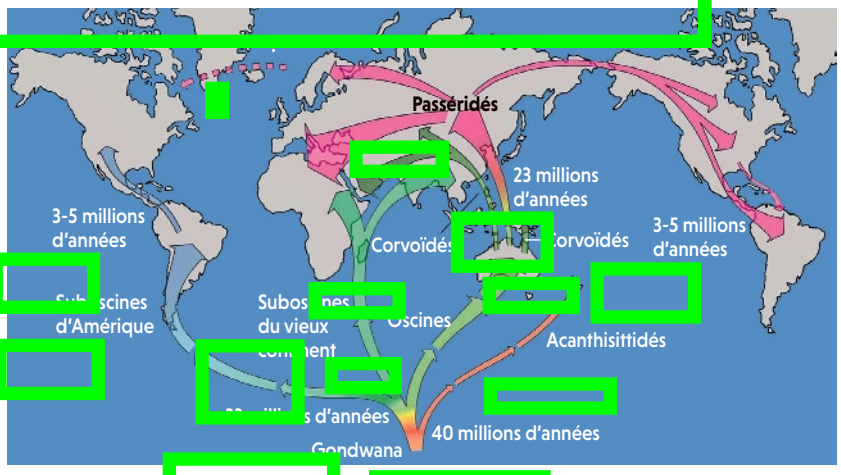
Pour le vérifier, une équipe internationale autour d'Alexander Suh, de l'université d'Uppsala, en Suède, a analysé le chromosome B du diamant mandarin. Il compte au moins 115 gènes, dont 32 s'expriment dans les ovaires et 6 dans les testicules. De plus, la plupart de ces gènes présentent des signes de sélection positive. Ainsi, bien que ce soient des copies de gènes distribués sur les chromosomes classiques, le chromosome B est indéniablement indispensable à l'animal.

Par phylogénie moléculaire, il est possible de reconstituer l'histoire de ce chromosome B. Son émergence paraît remonter à l'ancêtre hypothétique commun des passériformes. Il est sans doute présent chez les suboscines, ce qui restera à vérifier. Puis les gènes sont arrivés au fur et à mesure, certains récemment, il y a moins de 1 million d'années. Vu sa rapide dynamique évolutive et sa fonction essentielle, le chromosome a certainement joué un rôle fondamental dans l'isolement reproducteur lors de la diversification de masse des oiseaux chanteurs.

Ainsi, les oscines ont conquis les continents grâce à la surrection de la Wallacea et de la Nouvelle-Guinée, d'une part, et à l'acquisition d'un chromosome B, d'autre part. Sans oublier bien sûr le chant qui, en permettant au mâle de déterminer un territoire et d'y attirer une femelle, joue un rôle essentiel dans la spéciation! Les oiseaux sont décidément une magnifique illustration de l'importance de la contingence en biologie évolutive. ■

LA ROUTE DES PASSÉRIFORMES

Tous d'origine gondwanienne, les passériformes se sont diversifiés avec la séparation des continents : les acanthisittidés en Nouvelle-Zélande ; les suboscines en Amérique du Sud et en Afrique ; les oscines en Australie. Postérieurement, certaines espèces de suboscines se sont disséminées, qu'en Amérique du Nord, qui en Asie du Sud-Est. Mais les oscines présentent un cas bien particulier : la partie de l'Australie dans laquelle ils sont confinés est...



BIBLIOGRAPHIE

C. M. Kinsella *et al.*, **Programmed DNA elimination of germline development genes in songbirds**, *Nat. Commun.*, vol. 10, article 5468, 2019.

A. A. Totgasheva *et al.*, **Germline-restricted chromosome (GRC) is widespread among songbirds**, *PNAS*, vol. 116(24), pp. 11845-11850, 2019.

R. G. Moyle *et al.*, **Tectonic collision and uplift of Wallacea triggered the global songbird radiation**, *Nat. Commun.*, vol. 7, article 12 709, 2016.

P. G. Ericson *et al.*, **A Gondwanan origin of passerine birds supported by DNA sequences of the endemic New Zealand wrens**, *Proc. R. Soc. Lond. B*, vol. 269, pp. 235-241, 2002.

© Pour la Science, d'après P. G. Ericson et al., Proc. R. Soc. Lond. B, vol. 269, pp. 235-241, 2002

UN

NE MEURT JAMAIS.

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

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

GOÛT DE VIANDE POUR IMITATIONS DE VIANDE

À l'aide de coproduits de l'élevage, tels que les os, on peut donner du goût à des reproductions de viandes confectionnées à partir de végétaux.

L'AUTEUR

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

L'industrie de la viande s'occupe de valoriser des coproduits de l'élevage (os, peaux, tissus gras, abats, sang) pour donner du goût... à des reproductions végétales de viande! Ce goût qui apparaît à la cuisson résulte de nombreuses réactions: thermolyses, pyrolyses, «déshydratation intramoléculaire» des hexoses, hydrolyses, ou encore ces «réactions de Maillard» évoquées à tort et à travers. Examinons cela plus en détail.

Des brunissements surviennent quand on chauffe des sucres à haute température (caramélisation), mais des sucres en solution peuvent également brunir par la réaction de «déshydratation intramoléculaire» des hexoses. Par exemple, les pectines de végétaux chauffés libèrent leurs constituants, qui sont des petits sucres, dont le principal est l'acide galacturonique. Ce dernier se présente à l'état pur comme une poudre blanche, qui fait dans l'eau une solution incolore, comme un sirop habituel; mais le chauffage prolongé de cette solution conduit à une coloration brune (c'est peut-être pourquoi les bouillons de légumes brunissent).

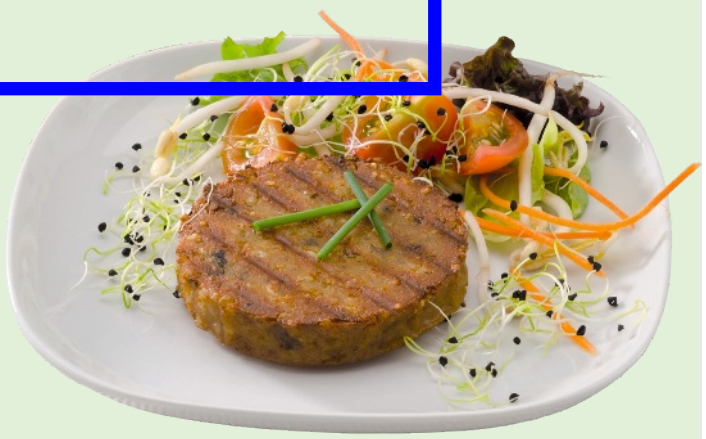
Des protéines chauffées brunissent aussi: on peut s'en convaincre en chauffant dans une poêle des protéines de lait ou de la gélatine. Il en est de même pour des acides aminés que l'on achètera dans des boutiques de diététique, ou que l'on produira en «hydrolysant» des protéines, notamment avec de l'ananas cru qui apporte l'enzyme protéase nommée «broméline».

Du chauffage de composés purs passons à des mélanges dont les constituants peuvent réagir. Par exemple, entre des sucres réducteurs et des acides aminés, on a une réaction découverte dès 1865 par le chimiste allemand Hugo Schiff. Quand ce sont les fonctions amines (un atome d'azote lié à un ou deux atomes d'hydrogène) des protéines qui réagissent avec des sucres réducteurs, la réaction s'effectue à des températures modérées... et elle porte abusivement le nom du chimiste nancéien Louis-Camille Maillard, car cette réaction n'est autre que la précédente...

En fait, il y a mille autres réactions de brunissement avec d'autres composés organiques, à haute température: des thermolyses ou des pyrolyses. Et tout cela se mêle dans les aliments réels, comme on le voit en grillant de la farine dans une poêle: ce mélange de polysaccharides, de protéines et de nombreux autres composés prend d'abord une couleur blonde et une belle odeur... que n'a pas l'amidon pur («fécule») chauffé dans les mêmes conditions.

Munis de ce bagage chimique, revenons à la valorisation des coproduits de l'élevage. Des chercheurs néozélandais ont cuit des os dans l'eau, avant de dégraisser la solution, de la concentrer et d'hydrolyser les protéines extraites à l'aide de protéases, afin de libérer davantage d'acides aminés libres; puis ils ont ajouté un sucre et chauffé. Les solutions obtenues étaient ensuite ajoutées à des reproductions de viande faites par extrusion de diverses protéines, provenant de gluten, d'albumine sérique bovine, de soja. Les reproductions de viande ainsi «assaisonnées» au goût de viande cuite étaient ensuite soumises à des jurys de dégustation.

Résultat: c'était pour une concentration en hydrolysat de 20 % que les reproductions de viande étaient préférées... Mais que vaut la majorité, en matière d'art culinaire? Si mon ami préfère du vin blanc et moi du rouge, ce n'est pas le rosé qui nous mettra d'accord! ■



Un steak à base de végétaux au goût proche de la viande? C'est possible, si l'on s'autorise à consommer un peu de substances dérivées de l'élevage.

LA RECETTE

1. À des déchets de viande, ajouter un peu d'ananas frais et stocker pendant deux jours au réfrigérateur, afin que les protéases du fruit (les bromélines) dissocient les protéines.
2. Ajouter du glucose et chauffer jusqu'à l'apparition d'une couleur brune.
3. Pour faire la reproduction de viande, mélanger 20 % de poudre de blanc d'œuf et 80 % d'eau. Assaisonner.
4. Cuire un peu de farine dans de l'eau et ajouter cet empois au mélange précédent.
5. Y ajouter la préparation brune obtenue à partir de l'hydrolysat de viande.
6. À l'aide d'une seringue sans aiguille ou d'une poche à douille, faire des structures filamentaires alignées, comme les fibres musculaires d'une bavette.
7. Faire sauter dans une poêle avec un peu de matière grasse pour éviter que cela n'attache. Saler, poivrer et servir.

© Pat Hastings / Shutterstock.com

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

Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves des enfants gravement malades.
Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie, nous avons besoin de vous.

Association Petits Princes

DON en CONFIANCE

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

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur www.pourlascience.fr

P. 2 21 000

C'est le nombre de géocroiseurs – des corps célestes dont la trajectoire approche celle de la Terre – actuellement recensés. Ils représentent un danger potentiel pour la vie sur Terre.

P. 18

« *La comparabilité internationale des données de mortalité et la standardisation des logiques de dépistage à grande échelle renforceraient la légitimité des autorités sanitaires au niveau mondial* »

VIRGINIE TOURNAY
politologue à Sciences Po

P. 32 39,3

Tel sera, en mètres, le diamètre du miroir principal du *Télescope géant européen*, actuellement en construction au Chili. Ce miroir aura donc une superficie équivalente à celle de trois terrains de basket.

P. 68 WALLACEA

Cette zone biogéographique comprend principalement les îles de la Sonde, de Sulawesi et la majorité des Moluques. Elle s'est formée il y a 25 millions d'années lorsque l'Australie a heurté l'Asie du Sud-Est. La Wallacea sépare deux régions aux biodiversités riches et distinctes. Zone tampon, elle présente aussi une richesse biologique exceptionnelle et est d'un grand intérêt dans l'étude de l'évolution.

P. NÉANDERSOVIENS

Ces humains eurasiens, ancêtres communs aux populations néandertaliennes et dénisoviennes, se seraient séparés en ces deux groupes distincts il y a environ 500 000 ans, et non il y a 380 000 ans comme on le pensait jusqu'ici. Les paléoanthropologues rattachent les Néandersoviens à l'espèce *Homo heidelbergensis*.

P. 58 NOMBRE-UNIVERS

On conjecture que π est un nombre univers car son développement décimal inclurait toutes les séquences possibles de chiffres aussi longues que l'on veut. Il existerait alors une séquence de 1 million de décimales de π codant une image de 1000×1000 pixels en 10 niveaux de gris et qui représenterait... votre portrait !

P. 12 110 000

C'est le nombre de variétés de riz différentes que cultivaient les agriculteurs indiens jusque dans les années 1970. Un recensement achevé en 2006 indique que, trois décennies plus tard, seules 6 000 variétés subsistent encore : une perte de biodiversité énorme.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal Mai 2020 – N° d'édition M0770511-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 –
Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 244 707– Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.

AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ, L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

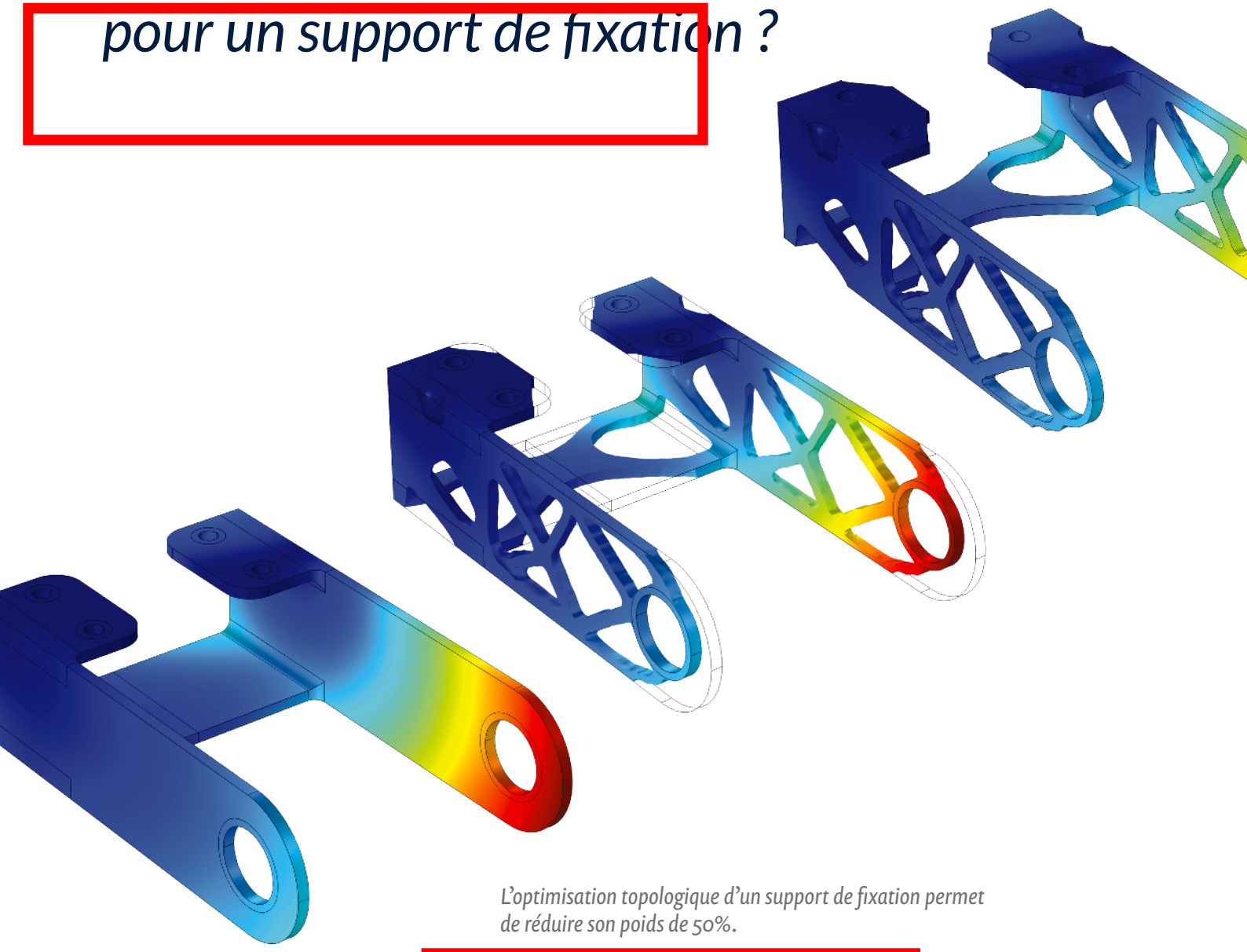
www.ademe.fr/theses

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION : OLFA NEMSI

Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



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

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

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

comsol.blog/density-topology

COMSOL