



SCIENCE

PRÉHISTOIRE

**LE GOUDRON,
UN SAVOIR-FAIRE
NÉANDERTALIEN**

ENVIRONNEMENT

**PIÉGER LE CO₂ :
LA PISTE DE
LA BIOMASSE**

HISTOIRE DES SCIENCES

**LA TOUR EIFFEL,
PREMIER LABORATOIRE
D'AÉRODYNAMIQUE**

L 13256 - 520 - F: 6,90 € - RD

FÉVRIER 2021
N° 520**ALZHEIMER, PARKINSON,
GREFFE DE MAIN, PROTHÈSES...**

LES POUVOIRS DE RÉGÉNÉRATION DU CERVEAU



BRAINCAST

La voix des neurones

Le podcast de *Cerveau & Psycho*

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

5^{ème} épisode

**Huntington et maladies neurologiques
héréditaires : quels espoirs de thérapie ?**

www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/

5^{ème} épisode

avec le Pr **Alexandra Durr**
interviewée par Sébastien Bohler

Neurologue et chercheur
en neurosciences





Certifié PEFC

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

**É
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

REMANIEMENTS À LA TÊTE DE L'ORGANISME

Gâce notamment aux techniques d'imagerie cérébrale telles que l'IRM fonctionnelle, qui permet de voir quelles régions du cerveau s'activent lorsque la personne effectue telle ou telle tâche, les neurosciences ont beaucoup progressé au cours des dernières décennies. Bien que le fonctionnement du cerveau, que ce soit le nôtre ou celui d'animaux plus simples, reste mal connu et mal compris, certaines zones d'ombre sont en train de s'éclaircir.

C'est le cas de ce qu'on appelle la «plasticité» du cerveau et, plus généralement, du système nerveux. Il s'agit de sa capacité à se reconfigurer à la suite de lésions cérébrales ou corporelles, ainsi que sous l'influence des interactions de l'individu avec son environnement et ses congénères. Un merveilleux pouvoir de réparation et d'adaptation que l'on cerne de mieux en mieux.

La neuroplasticité inclut notamment la formation de nouveaux neurones, ce que l'on pensait impossible chez l'adulte jusqu'aux années 1990. Depuis, non seulement les preuves de cette neurogenèse se sont multipliées, mais les chercheurs ont aussi trouvé des moyens de la stimuler, ce qui ouvre de prometteuses perspectives dans le traitement de maladies neurodégénératives ou de paralysies (voir pages 24 à 31).

Autre volet important de la neuroplasticité: la façon dont le cerveau se modifie pour s'adapter à l'amputation d'un membre ou à son remplacement par une prothèse, voire à son remplacement par un membre d'une autre personne, comme c'est le cas avec les greffes de main (voir pages 32 à 39). Les recherches conduisent à une caractérisation de plus en plus précise des remaniements qui s'effectuent dans le cerveau dans ces situations (voir pages 40 à 45). Elles contribuent ainsi à mieux comprendre le fonctionnement de cet étonnant organe. Peut-être encore plus important, elles aideront aussi à améliorer la qualité de vie de ceux qui ont perdu un membre, qui souffrent d'une paralysie ou qui sont atteints d'une maladie comme celle de Parkinson. ■

SOMMAIRE

N° 520 /
Février 2021

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- L'avantage quantique atteint avec des photons
- Un élixir de jeunesse pour la rétine
- Les racines et la concurrence
- Storegg, un tsunami pas trop destructeur
- Une tache solaire en haute résolution
- Les limites de la vie sous le plancher océanique
- Pourquoi les conifères ont décliné
- Un Pac-Man microfluidique
- Un organoïde de foie développé grâce à l'IA

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

HOMO SAPIENS INFORMATICS

De l'informatique à la métaphysique
Gilles Dowek

P. 22

QUESTIONS DE CONFIANCE

Armée de plumes pour guerres futures
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 46

PRÉHISTOIRE

COMMENT LES NÉANDERTALIENS FABRIQUAIENT-ILS DU GOUDRON ?

Patrick Schmidt

Les Néandertaliens produisaient du goudron collant à partir d'écorce de bouleau. Invention géniale ou fortuite ? L'archéologie expérimentale fait pencher la balance vers la deuxième hypothèse.



P. 54

PORTFOLIO

ITER, L'ASSEMBLAGE D'UN GÉANT

Clara Moskowitz

La construction d'Iter, qui constituera la plus grande expérience de fusion nucléaire, est un défi technologique d'envergure. La phase d'assemblage de ce réacteur a démarré il y a quelques mois. Aperçu en images.



P. 64

DÉVELOPPEMENT DURABLE

LA PISTE DE LA BIOMASSE POUR PIÉGER LE CO₂

Eric Toensmeier
et Dennis Garrity

Les scénarios visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C s'appuient sur le déploiement à grande échelle du captage et stockage du carbone par l'intermédiaire des végétaux. Pas si simple ni si facile !



P. 74

HISTOIRE DES SCIENCES

LA TOUR EIFFEL, PREMIER LABORATOIRE D'AÉRODYNAMIQUE EN FRANCE

José Eduardo Wesfreid

Dès l'aube du xx^e siècle, Gustave Eiffel profita de sa toute nouvelle tour pour étudier la chute libre et la résistance de l'air. Il construisit une soufflerie sur place, puis à Auteuil, ce qui lui permit d'atteindre une vitesse de l'air jamais étudiée auparavant...



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

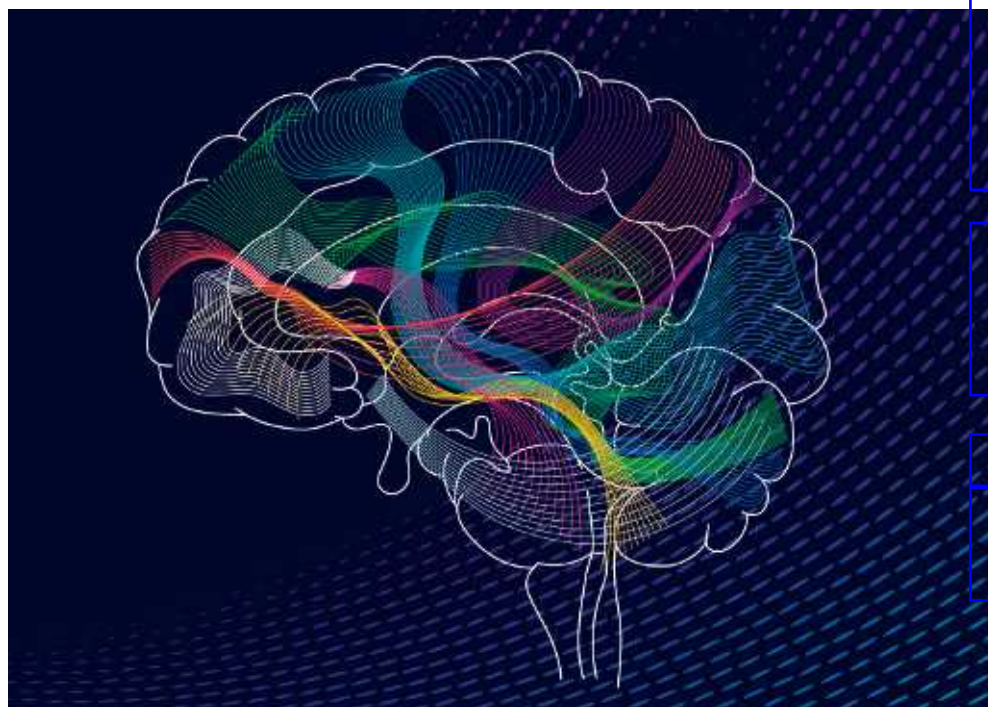


En couverture :

© Shutterstock.com/Aleksei Derin;
© Shutterstock.com/Veronika By

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

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



P.80

LOGIQUE & CALCUL
LES PREMIERS
SERONT-ILS
LES DERNIERS?

Jean-Paul Delahaye
et Philippe Mathieu

Même lorsque les règles d'un jeu sont précises, il est difficile de savoir quelle stratégie est la meilleure. Illustration avec le dilemme du prisonnier.

P.86

ART & SCIENCE
La murmuration
des étourneaux

Loïc Mangin



P.24

MÉDECINE

STIMULER LE POUVOIR
DE RÉPARATION
DU CERVEAU

Janosch Deeg

Après un accident ou une pathologie, les neurones se régénèrent à peine. Trois approches très différentes sont à l'étude pour stimuler la neuroplasticité, avec l'espoir de soigner un jour des maladies comme celles d'Alzheimer ou de Parkinson, ainsi que les paralégies.

P.32

NEUROSCIENCES

CE QUE LES GREFFES
DE MAIN RÉVÈLENT
DU CERVEAU

Scott H. Frey

On commence à avoir assez de recul sur la greffe de main pour en déduire, par imagerie cérébrale, comment le cerveau se réorganise à mesure que la personne greffée apprend à se servir de sa nouvelle main.

P.40

NEUROSCIENCES

«AU LIEU DE
PLASTICITÉ CÉRÉBRALE,
IL FAUDRAIT PARLER
D'ÉQUILIBRE
DYNAMIQUE»

Entretien avec
Alessandro Farnè

Il paraît de plus en plus clair que les régions cérébrales du contrôle moteur et de la perception tactile tendent en permanence à maintenir un équilibre qui préserverait les fonctions des membres.

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

La bougie de Lavoisier

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

Pourquoi les mollusques
sont modulaires

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Un bon goût de bouchon

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Homo sapiens informaticus

P.22 Questions de confiance

L'AVANTAGE QUANTIQUE ATTEINT AVEC DES PHOTONS



Ce dispositif photonique a permis de calculer en 200 secondes une grandeur dont le calcul sur un supercalculateur actuel aurait pris 2,5 milliards d'années.

Un dispositif photonique a surclassé en vitesse de calcul les meilleurs supercalculateurs actuels. Une prouesse de plus vers l'avènement des ordinateurs quantiques.

En 2019, Google a fait une annonce fracassante : ses équipes ont affirmé avoir atteint l'« avantage quantique » (aussi nommé « suprématie quantique »). Cette expression correspond au stade où un ordinateur quantique, dispositif encore largement en devenir, est capable d'effectuer un certain calcul beaucoup plus vite que n'importe quel ordinateur « classique ». Le résultat de Google a été rapidement contesté et a alimenté une farouche compétition autour de la réalisation de l'avantage quantique. Aujourd'hui, c'est une équipe chinoise menée par Jian-Wei Pan et Chao-Yang Lu, de l'université des sciences et des technologies de Hefei, qui affirme avoir atteint ce stade, par une tout autre approche que celle de Google.

Un ordinateur classique manipule l'information sous la forme de bits, qui prennent la valeur « 0 » ou « 1 ». L'ordinateur quantique, lui, manipule des bits quantiques, ou qubits, qui reposent sur le principe quantique de superposition des états : un qubit peut être une superposition de l'état « 0 » et de l'état « 1 ». Cette subtilité, si elle est correctement exploitée, permet en théorie de réaliser certains calculs beaucoup plus vite qu'avec des dispositifs classiques.

Une analogie courante est celle de l'exploration d'un labyrinthe : là où un ordinateur classique ne peut suivre qu'un chemin à la fois, un ordinateur quantique les explore tous simultanément, gagnant ainsi beaucoup de temps. Autre exemple plus concret : l'implémentation de l'algorithme quantique de Shor (conçu par Peter Shor) permettrait de calculer très

vite la décomposition en facteurs premiers d'un entier très grand. Or de nombreux systèmes cryptographiques reposent aujourd'hui sur le fait qu'un ordinateur classique met un temps rédhibitoire pour exécuter une telle tâche.

Construire un ordinateur quantique est cependant un véritable défi technologique. Un état de superposition quantique est très fragile et la moindre perturbation due à l'environnement réduit à néant les performances du dispositif. D'où la difficulté à fabriquer de telles machines, et de nombreuses approches sont à l'étude pour réaliser des qubits.

Par exemple, le processeur quantique Sycamore de Google utilise des circuits supraconducteurs. Avec 53 qubits, il a réalisé en 200 secondes un calcul « inutile », mais conçu spécifiquement pour être difficile à traiter sur une architecture classique. L'équipe de Google a affirmé qu'il faudrait 10 000 ans sur un supercalculateur pour arriver au même résultat. Mais peu de temps après, IBM a annoncé être capable d'effectuer

ce même calcul en seulement deux jours et demi grâce à une optimisation de l'algorithme classique. Sycamore est certes plus rapide, mais l'écart n'est pas si grand. Peut-on alors vraiment parler d'avantage quantique?

La course est relancée avec le dernier résultat de l'équipe de Jian-Wei Pan et Chao-Yang Lu. L'approche de ces chercheurs s'appuie sur l'échantillonnage de bosons, une idée proposée en 2011 par Scott Aaronson, aujourd'hui à l'université du Texas à Austin, et Alex Arkhipov, son doctorant à l'époque. Cette méthode est aussi conçue spécifiquement pour atteindre l'avantage quantique avec un calcul inutile, mais très difficile à reproduire sur un ordinateur classique. Le principe revient à envoyer en parallèle un certain nombre de photons (qui font partie de la famille des bosons) individuels et indiscernables dans un système optique constitué d'un réseau de miroirs semi-réfléchissants. Les sorties du dispositif sont équipées de détecteurs de photons uniques.

Le système agit comme un interféromètre de grande taille et on cherche à calculer les probabilités jointes de détection de photons, c'est-à-dire les corrélations entre plusieurs détecteurs (par exemple la probabilité d'avoir un signal sur les détecteurs 3, 8 et 14; ou sur les détecteurs 1, 2, 3 et 7; etc.). Un ordinateur classique calcule avec difficulté ces probabilités. Pour les obtenir, le calcul

complet prend la forme d'une matrice dont il faut estimer le «permanent», une grandeur qui se rapproche du déterminant de la matrice, mais qui est bien plus fastidieuse à calculer. La complexité de ce calcul croît exponentiellement avec le nombre de photons détectés. Au-delà de quelques dizaines de photons, le résultat est hors de portée des ordinateurs classiques.

Jiuzhang a réalisé un calcul inutile très difficile à reproduire sur un ordinateur classique

Avec un ordinateur quantique, la résolution du problème est plus simple. Il n'y a pas besoin de faire le calcul laborieux du permanent de la matrice. Il suffit de réaliser le dispositif optique avec les miroirs semi-réfléchissants. Les photons injectés jouent en quelque sorte le rôle des qubits et vont alors «explorer» toutes les possibilités (comme dans l'analogie du labyrinthe). En répétant l'expérience un grand nombre de fois, on obtient la distribution statistique des photons et les probabilités jointes.

À la suite de la proposition de Scott Aaronson et Alex Arkhipov, de nombreux

spécialistes pensaient qu'il serait expérimentalement difficile de contrôler assez de photons dans le dispositif imaginé pour atteindre l'avantage quantique. En effet, pour que le système fonctionne, il faut, entre autres, pouvoir générer des photons individuels et indiscernables de façon synchrone. Les physiciens avaient réalisé ce dispositif avec une poignée de photons puis, en 2019, l'équipe de Jian-Wei Pan a développé un système d'échantillonnage de bosons portant sur une dizaine de photons. Les chercheurs ont montré que le calcul classique était difficile pour un ordinateur individuel, mais encore à la portée d'un supercalculateur.

Pour accroître encore le nombre de photons, ils ont utilisé une variante de l'échantillonnage de bosons, l'«échantillonnage gaussien de bosons», qui n'utilise plus des sources de photons uniques. L'«ordinateur quantique» de l'équipe chinoise, nommé Jiuzhang, comporte 100 entrées. Les photons traversent ensuite un circuit de 300 miroirs semi-réfléchissants et 75 miroirs. Ils émergent par l'une des 100 sorties munies d'un détecteur. Les chercheurs ont obtenu la distribution de probabilité de photons en 200 secondes environ. Ils avaient en moyenne 43 photons détectés pour chaque tirage, et un maximum de 76 photons. Ces nombres élevés de particules donnent une idée de la complexité du calcul à traiter par l'approche classique.

Les chercheurs ont estimé que le supercalculateur chinois Sunway TaihuLight (quatrième supercalculateur mondial en novembre 2020) exécutant un algorithme optimisé obtiendrait le même résultat en 2,5 milliards d'années! De façon générale, les spécialistes saluent le résultat de l'équipe de Jian-Wei Pan. La performance technique est une démonstration forte des progrès de la photonique dans la course à l'ordinateur quantique. Cependant, nombre de chercheurs soulignent que, pour l'instant, une machine comme Jiuzhang n'effectue pas un calcul utile et n'est pas programmable pour résoudre des problèmes concrets – contrairement à la puce Sycamore de Google, qui est un vrai processeur programmable mais limité par son petit nombre de qubits. La course à l'ordinateur quantique continue! ■

SEAN BAILLY

H.-S. Zhong et al., *Science*, en ligne le 3 décembre 2020



Le processeur Sycamore qui est au cœur de l'ordinateur quantique de Google manipule 53 qubits. Il est programmable, contrairement au dispositif photonique de l'équipe de Hefei.

NEUROBIOLOGIE

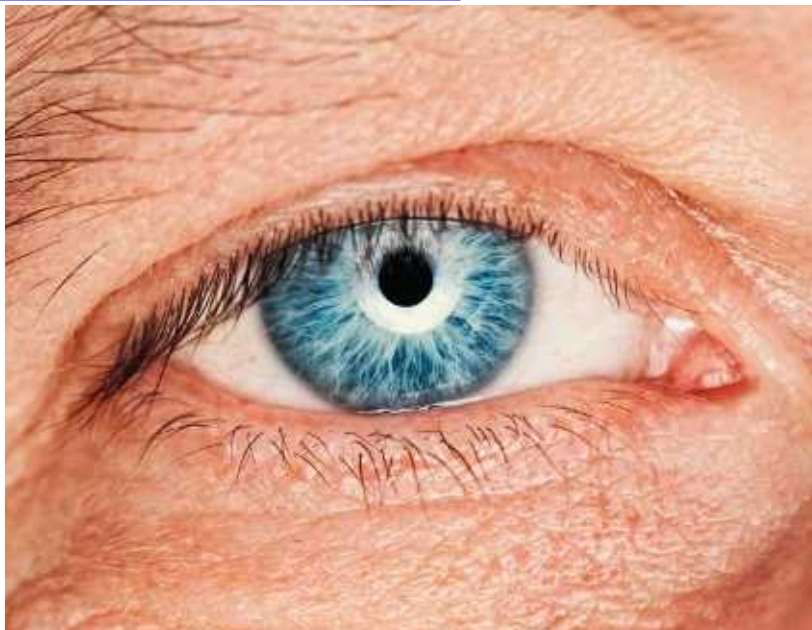
UN ÉLIXIR DE JOUVENCE POUR LA RÉTINE

Des biologistes ont inversé le processus de vieillissement des cellules rétiniennes de souris, ce qui a restauré en partie la vision des animaux.

Le vieillissement est avant tout une affaire de bruit. Pour le comprendre, il faut se tourner vers l'épigénétique, une discipline étudiant les mécanismes qui modifient l'expression des gènes de façon réversible et sans altérer leur séquence. À l'aube de la vie, durant le développement embryonnaire, l'un de ces mécanismes, la méthylation de l'ADN, établit des « patrons » qui fixent l'identité et, par extension, la fonction de chaque cellule de l'organisme. Hélas, au fil du temps, et pour des raisons encore mal comprises, ces patrons s'altèrent, produisant un « bruit épigénétique » qui perturbe l'expression originale des gènes et provoque le vieillissement des cellules. Chez les mammifères, le système nerveux central est l'un des premiers à subir les conséquences de ce phénomène, notamment en perdant ses capacités régénératrices. Mais si les mécanismes épigénétiques sont réversibles, serait-il possible de réaliser l'un des plus vieux rêves de l'humanité en inversant le processus du vieillissement ? David Sinclair, de la faculté de médecine de l'université Harvard, et ses collègues se sont penchés sur la question chez des souris âgées ou atteintes d'un glaucome. Grâce à trois gènes, ils sont parvenus à restaurer la prime jeunesse et la fonctionnalité partielle de leurs yeux.

Ces biologistes ont visé les neurones de la rétine – les cellules ganglionnaires qui constituent le nerf optique, lui-même en charge de la perception visuelle. Lorsque les axones de ces cellules – les fibres nerveuses qui conduisent les signaux électriques jusqu'au cerveau – sont endommagés par le vieillissement naturel ou une maladie telle que le glaucome, il s'ensuit une perte progressive de la vision allant jusqu'à la cécité. L'objectif des chercheurs était donc de réinitialiser l'épigénome de ces neurones, c'est-à-dire l'ensemble de leurs modifications épigénétiques, sans effacer leur identité, afin de rétablir leurs capacités régénératrices.

Pour ce faire, ils ont recouru à un cocktail de gènes utilisé en 2006 par le Prix Nobel de médecine Shinya Yamanaka pour reprogrammer génétiquement des cellules spécialisées en cellules souches pluripotentes, capables de se différencier en certains types cellulaires.



Le glaucome est une maladie dégénérative du nerf optique qui détériore la vision. Une piste pour le contrer est de rajeunir les neurones qui constituent ce nerf.

Exprimés au stade embryonnaire et réprimés à l'âge adulte, ces gènes codent des protéines nommées « facteurs de transcription » qui régulent l'expression de différents gènes. La reprogrammation qu'ils induisent réinitialise en quelque sorte les cellules et, notamment, remet à zéro « l'âge de méthylation de l'ADN ».

David Sinclair et ses collègues ont fait exprimer trois gènes du cocktail chez leurs souris modèles pendant plusieurs jours, puis ils ont étudié les effets sur des gènes altérés par l'âge. Résultat : les neurones modifiés avaient retrouvé leurs patrons originaux de méthylation et le profil d'expression de leurs gènes n'était plus perturbé. De plus, leur axone repoussait, leur identité était conservée et aucune tumeur n'avait émergé. La vision des souris a par ailleurs été partiellement restaurée. Une piste novatrice et engageante pour laquelle il faudra notamment vérifier les effets à long terme. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

Y. Lu et al., *Nature*, vol. 588, pp. 124-129, 2020

SURVIVRE DANS LE KÉFIR

Le kéfir est une boisson de lait fermenté, qui contient des colonies de bactéries et de levures. Sonja Blasche et ses collègues du Laboratoire européen de biologie moléculaire, en Allemagne, ont montré que, par eux-mêmes, la plupart des microorganismes qui composent le kéfir ne sont pas adaptés pour survivre dans le lait. Cependant, en communauté, ils sont capables de coloniser ce dernier en produisant chacun des métabolites qui permettent aux autres de survivre dans ce milieu.

Nature Microbiology,
4 janvier 2020

MÉTHANE SOUS INFLUENCE LUNAIRE

D'importantes quantités de méthane gisent dans les sédiments du plancher de l'océan Arctique. Nabil Sultan, de l'Ifremer, et ses collègues ont montré que ces gisements étaient sensibles à de faibles variations de pression de la colonne d'eau au-dessus, et donc de la marée : à marée haute, la pression est plus importante, il y a moins de fuites de gaz, et inversement à marée basse. Les émissions de gaz à effet de serre en Arctique seraient ainsi sous l'influence... de la Lune !

Nature Comm., 9 octobre 2020

RECYCLER L'ARGENT ET LE PALLADIUM

L'industrie fait un usage important de métaux rares comme le palladium ou l'argent, mais ceux-ci sont disponibles en quantités limitées et on les retrouve dans les déchets où ils deviennent une source de pollution. Foni Biswas et ses collègues, de l'université de Kanazawa, au Japon, ont mis au point un procédé de recyclage de ces deux métaux. En utilisant comme adsorbant de la cellulose modifiée, ces chercheurs ont pu extraire 99 % du palladium et de l'argent présents dans des rejets industriels.

Chemical Engineering Journal,
5 octobre 2020

LES RACINES ET LA CONCURRENCE

Sières de l'absorption de l'eau et des nutriments du sol, les racines conditionnent la croissance végétale et donc les rendements agricoles. À l'échelle globale, elles représenteraient un tiers de la biomasse végétale vivante et constituent ainsi d'importants réservoirs de carbone. Cependant, la croissance du réseau racinaire était jusqu'ici assez mal comprise, notamment en présence de plusieurs réseaux concurrents. Les plantes ont-elles une stratégie « agressive » pour préempter un maximum de ressources ou « coopérative » avec un partage équitable ?

En s'appuyant sur la théorie des jeux, **Ciro Cabal**, de l'université de Princeton, aux États-Unis, et ses collègues ont établi un nouveau modèle capable d'expliquer la répartition des racines dans le sol. Leur modèle prend en compte le coût pour la plante de développer une racine en fonction de la distance de cette dernière à la tige. Plus une racine croît loin de la tige, plus elle coûte en énergie et en matière à la plante, car il faut y transporter des molécules organiques et y mettre en place un ensemble de vaisseaux capables d'acheminer l'eau et les



© C. Cabal / université de Princeton

Des plants de poivrons ont été placés seuls ou par deux pour étudier comment le réseau de racines se développe dans ces deux situations.

nutriments jusqu'à la tige. Et comme une plante est capable de percevoir les ressources dans le sol environnant, mais aussi la présence de racines étrangères, elle répond à ces stimuli et adapte le développement de ses racines. D'après le modèle, en présence de concurrents, la plante diminue l'étendue de son système racinaire, mais développe une surdensité de racines près de sa tige. Les chercheurs ont confirmé ce comportement en observant les racines de plants de poivrons cultivés seuls ou par deux. ■

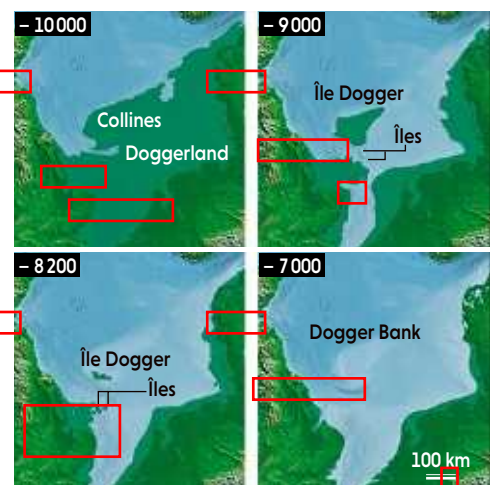
NICOLAS BUTOR

C. Cabal *et al.*, *Science*, vol. 370,
pp. 1197-1199, 2020

GÉOSCIENCES

STOREGGA, UN TSUNAMI PAS TROP DESTRUCTEUR

Depuis longtemps, les archéologues s'étonnaient de ne pas avoir retrouvé de traces des habitants du Doggerland, une masse de terre qui, il y a 8200 ans, occupait encore une bonne partie de la mer du Nord quand se produisit le plus grand tsunami connu, le Storegga. En 2018, James Walker, de l'université de Bradford, et ses collègues ont carotté un grand système paléofluvial situé sous la mer face au Lincolnshire dans le sud de l'Angleterre. Ils y ont découvert les dépôts turbulents du Storegga jusqu'à 42 kilomètres à l'intérieur des anciennes vallées, mais aucune sur les terres attenantes. Cela suggère que dans le sud du Doggerland, le tsunami fut canalisé par les rivières, tandis que sa violence était atténuée par l'île Dogger, une île de l'époque devenue aujourd'hui le Dogger Bank, un immense banc de sable situé à 20 mètres de profondeur en pleine mer du Nord. Il est clair



© M. Muru

La plus grande partie du Doggerland aurait disparu en 1000 ans il y a quelque huit millénaires.

désormais que si le Storegga a certainement traumatisé les populations du Doggerland, celles-ci n'ont disparu que bien après lui. ■

FRANÇOIS SAVATIER

J. Walker *et al.*, *Antiquity*, vol. 94, pp. 1409-1425, 2020 ;
V. Gaffney *et al.*, *Geosciences*, vol. 10, art. 270, 2020

EN IMAGE

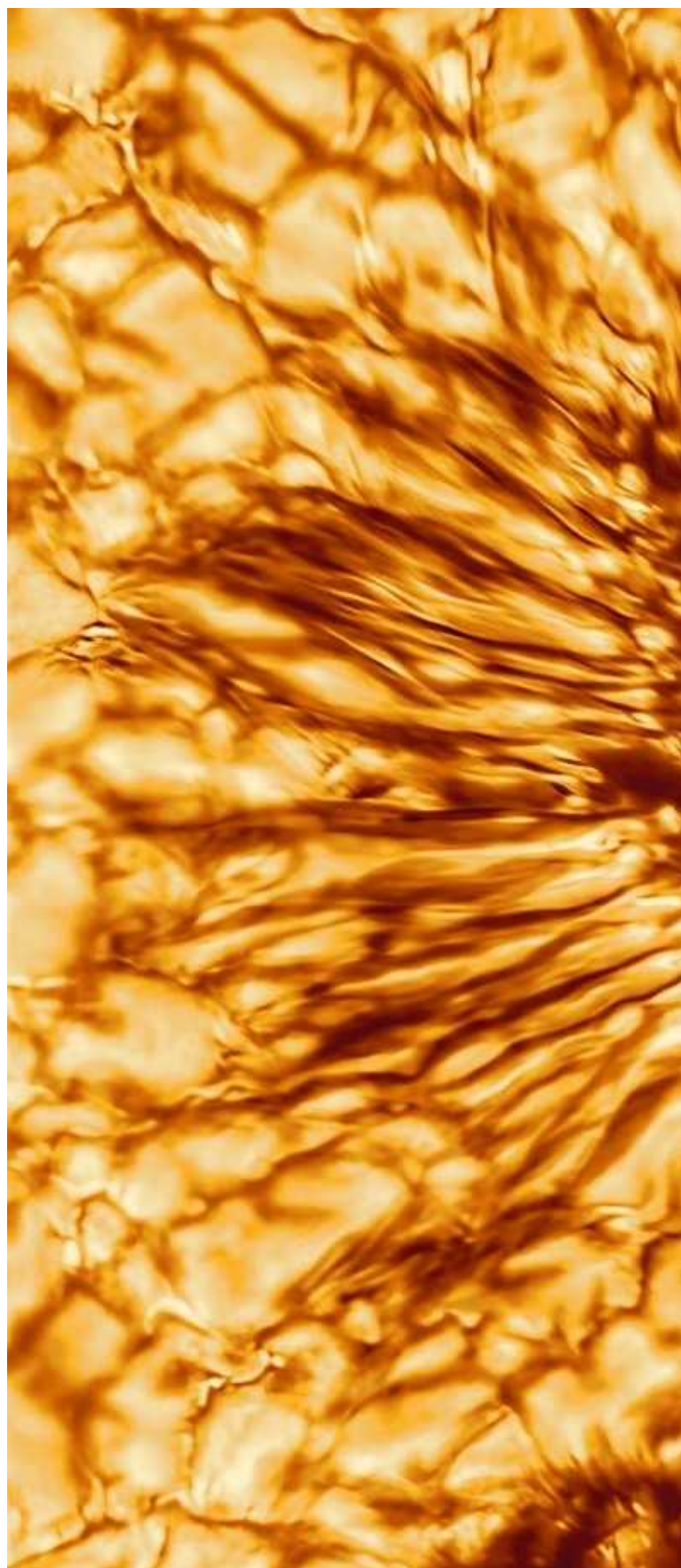
UNE TACHE SOLAIRE EN HAUTE RÉOLUTION

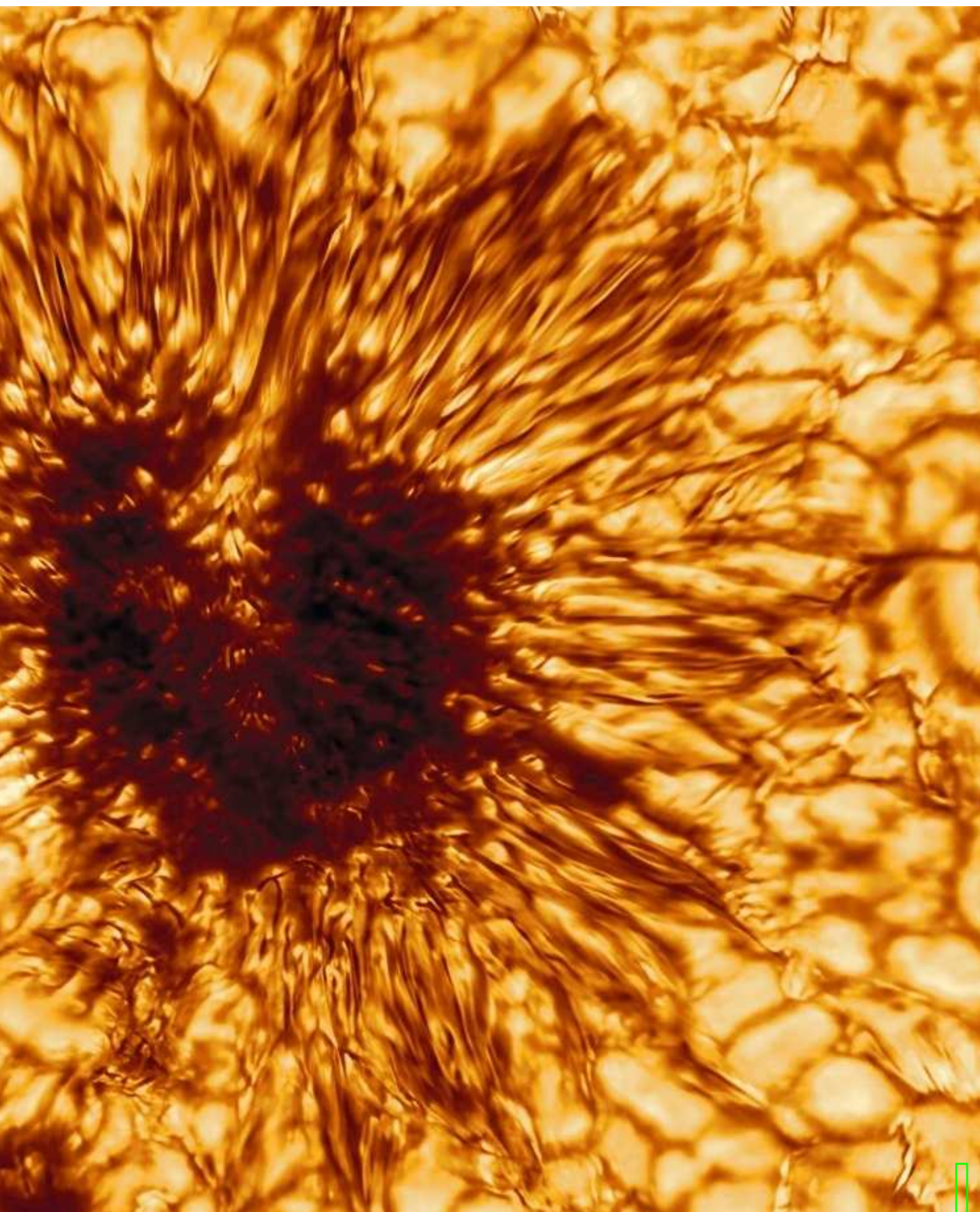
Les fans de l'œuvre de Tolkien auront bien évidemment pensé à l'œil de Sauron. Il s'agit en réalité d'une tache solaire photographiée, avec une résolution jamais atteinte, par le télescope solaire *Daniel K. Inouye*. Alors que le début de sa campagne d'observation officielle a été retardé à cause de la pandémie de Covid-19, l'instrument a déjà produit des clichés spectaculaires et prometteurs. Le télescope, installé sur le volcan Haleakalā, à Hawaï, aura une résolution spatiale 2,5 fois supérieure à celle de tous les autres instruments qui étudient le Soleil.

L'image de la tache solaire d'un diamètre de 16 000 kilomètres a été prise en janvier 2020. Elle pourrait facilement contenir la Terre. On distingue sur cette photo de nombreux détails de l'action du champ magnétique localement intense, qui empêche le gaz très chaud de remonter des profondeurs vers la surface. Cette région sombre est donc plus froide (mais à plus de 4 000 °C tout de même) que les zones autour. La tache marque le début d'un nouveau cycle d'activité solaire. Ces cycles durent onze ans et un minimum avait été atteint en décembre 2019. Le nombre de taches devrait donc croître dans les années à venir. Une activité qui sera suivie de près par le télescope *Daniel K. Inouye*. ■

S. B.

T. R. Rimmele et al., *Solar Physics*,
vol. 295, article 172, 2020





© NSO/AURA/NSF

MICROBIOLOGIE

LES LIMITES DE LA VIE SOUS LE PLANCHER OCÉANIQUE

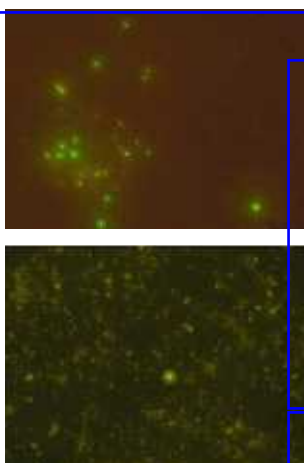
On a détecté des microorganismes dans des sédiments situés à plus de un kilomètre sous le plancher océanique, où la température s'élève jusqu'à 120 °C.

La Terre contient une variété fascinante d'organismes vivants qui occupent tous ses environnements, même les plus extrêmes. Les conditions de vie normales de ces extrêmophiles seraient mortelles pour n'importe quel autre être vivant. Certains s'épanouissent par exemple dans des milieux très salés, comme la mer Morte. Les sédiments situés sous les fonds océaniques forment aussi un habitat particulièrement rude: la température y augmente à mesure que l'on s'enfonce en profondeur (on parle de «gradient géothermique»). Les chercheurs pensent depuis une trentaine d'années que des organismes unicellulaires, dits «thermophiles», pourraient y vivre jusqu'à une profondeur de plusieurs kilomètres... mais quelles sont leurs limites? Verena Heuer, de l'université de Brême, en Allemagne, et une équipe internationale ont révélé que des organismes vivent effectivement dans de tels sédiments sous des conditions très inhospitalières.

En laboratoire, les organismes thermophiles sont capables de survivre, quoique brièvement, jusqu'à une température de 122 °C, s'ils ont à disposition d'abondantes sources d'énergie (sous la forme d'un substrat moléculaire exploitable par la machinerie cellulaire). Mais qu'en est-il en conditions réelles, dans les sédiments sous-marins où de telles sources se raréfient avec la profondeur? Pour le savoir, les chercheurs ont mené en 2016 une expédition à bord du *Chikyu*, un navire de forage en eaux profondes. Comme le gradient géothermique moyen de la Terre est de 3 °C par 100 mètres, il faudrait normalement forer jusqu'à quatre kilomètres sous le plancher océanique pour atteindre des sédiments dont la température s'élève à 120 °C; une entreprise techniquement difficile. Pour cette raison, les géologues ont choisi la dépression océanique de Nankai, au large de l'île japonaise de Honshū, car le gradient géothermique y est exceptionnellement plus fort. Là, à 4,8 kilomètres sous la surface de l'océan, il leur a suffi de creuser un trou de 1,2 kilomètre de profondeur à partir du plancher océanique pour atteindre les 120 °C recherchés.



L'équipe internationale a fait appel au navire *Chikyu*, équipé pour forer à plus de 1 kilomètre de profondeur dans le plancher océanique, lui-même situé, dans la dépression océanique de Nankai, à près de 4,8 kilomètres sous la surface.



Grâce à des techniques de microscopie à fluorescence, les chercheurs ont recensé la quantité de microorganismes dans divers échantillons. Plusieurs microorganismes ont été détectés (en haut) dans le prélèvement effectué à 652 mètres dans le plancher océanique (la température était de 76 °C. Un seul a été identifié au centre du prélèvement réalisé à 1176,8 mètres de profondeur (120 °C) (en bas).

La densité des populations microbiennes a chuté drastiquement dès 45 °C; seulement 100 cellules par centimètre cube de sédiments étaient alors détectées, loin du milliard d'organismes habituellement trouvés dans le sol. À l'inverse, la concentration d'endospores a rapidement augmenté, pour atteindre son pic dans les couches sédimentaires à 85 °C. Une endospore est une forme dormante adoptée par certains organismes unicellulaires pour résister à des conditions défavorables sur de très longues périodes.

Le forage a aussi révélé de larges intervalles sédimentaires dépourvus de vie, alors que, plus loin en profondeur, des cellules actives ont à nouveau été détectées dans des zones pourtant plus chaudes et même jusqu'à 120 °C. La raison d'une telle disparité reste à élucider, mais ces travaux permettent d'esquisser une idée des «limites de la vie» sur Terre. Ils laissent imaginer que même ailleurs, sur d'autres planètes, des organismes extrêmophiles pourraient surmonter des conditions aussi inhospitalières. ■

W. R.-P.

V. B. Heuer et al., *Science*, vol. 370, pp. 1230-1234, 2020

LASSOS DE SERPENTS

On ne connaissait que quatre types de mouvements chez les serpents. Julie Savidge et ses collègues, de l'université d'État du Colorado, en ont décrit un cinquième. Ils ont en effet observé sur l'île de Guam des serpents bruns arboricoles capable de grimper à des poteaux épais en s'enroulant autour et en ondulant, imitant ainsi le mouvement d'un lasso. La découverte aidera-t-elle à mieux orienter les efforts de conservation des oiseaux de cette île, dont les nids sont la proie des serpents ?

Current Biology, 11 janvier 2021

JUMEAUX PRESQUE IDENTIQUES

Les différences entre jumeaux monozygotes sont souvent attribuées à des facteurs liés à l'environnement, mais pas seulement... Leurs génomes sont quasi identiques, avec des variations qui restaient à quantifier. En étudiant le patrimoine génétique de 387 paires de jumeaux et de leurs parents, Hákon Jónsson, de la société deCODE Genetics, en Islande, et ses collègues ont montré que leurs génomes diffèrent, en moyenne, par 5,2 mutations présentes dès les premiers stades du développement embryonnaire.

Nature Genetics, 7 janvier 2021

ARTEFACTS EN OS DE BALEINE

Une équipe autour de Alexandre Lefebvre, de l'université Toulouse-Jean-Jaurès, a découvert sur la côte nord atlantique espagnole une cinquantaine d'artefacts en os de baleine vieux de 15 000 à 18 000 ans, les plus anciens connus dans la région ibérique. Si les conditions exactes de fabrication de ces objets restent inconnues, leur répartition autour du Pays basque nous renseigne sur les réseaux d'échanges et de communication de cette période.

Quaternary Science Reviews, 1^{er} janvier 2021

POURQUOI LES CONIFÈRES ONT DÉCLINÉ

A l'ère secondaire, il y a entre 252 et 66 millions d'années, les conifères (pins, épicéas, cèdres, genévriers, ifs ou thuyas) dominaient dans la végétation. Mais aujourd'hui, les gymnospermes, dont les conifères constituent le principal groupe, ne représentent plus que 1% des espèces végétales terrestres, contre près de 90% d'angiospermes, ou plantes à fleurs. On avançait jusqu'à récemment trois hypothèses pour expliquer le déclin des gymnospermes: les modifications du climat, une extinction massive d'espèces ou la compétition entre groupes végétaux. L'étude de Fabien Condamine et ses collègues, de l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier, indique que même si le climat semble avoir joué un rôle, c'est surtout la compétition entre gymnospermes et angiospermes qui serait en cause.

Cette équipe a analysé l'évolution de la diversité des conifères d'une part à partir des données fossiles disponibles, d'autre part à partir des données de phylogénie moléculaire (données relatives à l'ADN), qui permettent de reconstruire les liens de parenté des espèces. Dans les deux cas, les chercheurs ont constaté qu'il y a eu un long déclin des conifères depuis le Crétacé moyen (il y a 100 à



© Shutterstock.com / Mykola Mazuruk

Les conifères ne comptent aujourd'hui plus que quelque 630 espèces, soit 1% des espèces végétales terrestres, alors que ce groupe était dominant à l'ère secondaire.

110 millions d'années). Pour l'expliquer, ils ont modélisé l'impact de deux facteurs sur la diversification de ce groupe: le changement climatique (variation de la température et de la teneur en carbone atmosphérique) et l'essor des angiospermes. Résultat: depuis le Crétacé, la diversification des conifères est fortement et directement liée à la diversité croissante des plantes à fleurs, l'impact du climat étant nettement moindre, ce qui suggère une compétition directe entre les deux groupes. ■

ISABELLE BELLIN

F. L. Condamine *et al.*, *PNAS*, vol. 117(46), pp. 28867-28875, 2020

ASTROPHYSIQUE

CRISE COSMIQUE AGGRAVÉE

Quelle est la vitesse d'expansion de l'Univers? Deux méthodes obtiennent des valeurs incompatibles: l'une s'appuie sur le fond diffus cosmologique (le premier rayonnement émis lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans), l'autre reconstruit la relation distance-vitesse d'éloignement au cours de l'histoire cosmique. Dans cette seconde approche, les astrophysiciens mesurent des distances avec la parallaxe (une mesure angulaire) pour les objets les plus proches, puis avec des chandelles standard (des astres dont on connaît la luminosité intrinsèque tels que les céphéides, des étoiles variables, ou les supernovæ). Grâce aux mesures très précises de parallaxes dans la Voie lactée du satellite *Gaia*, Louise Breuval, du Lesia et de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont réalisé un meilleur étalonnage des distances pour les céphéides.



© ESA/Gaia/DPAC; CC BY-SA 3.0 IGO/A. Molinhe

Vue de la Voie lactée enrichie des données les plus récentes de *Gaia*.

L'astrophysicien Adam Riess et son équipe ont alors recalculé le taux d'expansion (73,2 kilomètres par seconde et par mégaparsec) et montré qu'avec une incertitude fortement réduite, le désaccord s'en trouve aggravé. ■

S. B.

L. Breuval *et al.*, *A & A*, vol. 643, A115, 2020;
A. G. Riess *et al.*, *arxiv.org/abs/2012.08534*

ARCHÉOLOGIE

UNE TOMBE ARMORICAINE... EN NORMANDIE

Une culture de l'âge du Bronze bien connue en Bretagne – la « culture des Tumulus armoricains » – était aussi présente en Normandie: une équipe de l'Inrap, dirigée par Emmanuel Ghesquière, l'a constaté avec une tombe princière découverte à Giberville, près de Caen. Vieille de quelque 2700 ans, elle traduit le luxe caractérisant les tombes de chefs de cette culture.

Curieusement, les objets les plus prestigieux sont quatorze pointes de flèche en silex. Remarquablement taillées, très standardisées et réalisées dans un silex bien choisi, ces pointes à ailerons sont l'une des spécificités du Bronze ancien de l'ouest de la France. Rarement abîmées, ces armatures de flèche n'étaient pas destinées à servir, mais l'étude des traces qu'elles portent suggère qu'elles étaient néanmoins emmanchées. Sans doute étaient-elles transmises plusieurs générations durant avant d'être sacrifiées dans une tombe.

Le poignard en bronze mis au jour est typiquement armoricain: six rivets permettaient de fixer une poignée se terminant sur une lunule centrale en début de lame; deux filets suivent les bords de la lame. Pour le moment, seules trois autres sépultures contenant aussi un



L'une des quatorze pointes de flèche trouvées dans la tombe princière.

© Clément Nicolas

poignard et des pointes de flèches en forme d'ogive sont connues en Normandie. Ce type de poignard était un marqueur de statut pour les membres masculins de l'élite. On les arborait au côté, dans un fourreau de bois ou de cuir.

Bien plus discrets, quelques éléments de parures en ambre de la Baltique achèvent de caractériser le statut princier de la sépulture de Giberville, en illustrant le fait que les membres de haut rang de culture des Tumulus armoricains bénéficiaient de réseaux d'échange au long cours. ■

F. S.

Inrap, communiqué du 8 décembre 2020, <https://bit.ly/3ohN3Bx>

ENTOMOLOGIE

CHARANÇONS FUNGICULTEURS

On savait que les fourmis et les termites pratiquent la culture de champignons.

Il faut maintenant compter sur certaines espèces de charançons. Peter Biedermann, de l'université de Würzburg, en Allemagne, a étudié des colonies de *Xyleborus affinis*. Cette espèce sociale creuse des galeries dans du bois et d'autres végétaux, comme la canne à sucre, morts ou malades. Elle crée ainsi des réseaux de tunnels dont les murs sont recouverts de différentes espèces de champignons, apportés par la femelle qui fonde la colonie (en les transportant soit dans son système digestif, soit dans le mycetangium, une poche spécialisée). Les charançons ne consomment que certaines de ces espèces, en particulier du genre *Raffaelea*. Ils sélectionnent les champignons bénéfiques en éliminant les



Xyleborus dispar est une espèce proche de *Xyleborus affinis*. Elle se nourrit elle aussi de champignons xylophages.

© Shutterstock.com/Tomasz Mejdyasz

autres grâce à des sécrétions contenant une bactérie qui produit un antibiotique, la cycloheximide. On peut ainsi parler de relation symbiotique: *X. affinis* se nourrit de *Raffaelea*, et en retour contribue à le disperser. ■

THÉO TORCO

P. H. W. Biedermann, *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 8, article 518954, 2020

EN BREF

VAGUES DE MAÏZENA

Les fluides non newtoniens (comme l'eau avec de la maïzena) se solidifient quand on leur applique une force importante. Baptiste Darbois Texier et ses collègues, de l'université Aix-Marseille, ont étudié l'écoulement de la maïzena sur un plan incliné. Le fluide forme des ordes régulières qui n'ont pas d'équivalent dans les fluides classiques. Cette instabilité ne résulte pas de l'effet de l'inertie, mais des propriétés d'écoulement spécifiques aux suspensions de maïzena.

Nat. Comm. Physics, 18 décembre 2020

DES NEURONES PLUS VULNÉRABLES

Chez une personne souffrant de la maladie d'Alzheimer, des protéines tau s'accumulent dans les neurones et conduisent à la mort prématurée de ces cellules. Lea Grinberg, de l'université de Californie à San Francisco, et ses collègues ont montré que certains neurones sont plus sensibles à ces protéines et meurent plus vite. Ils ont constaté que ces cellules moins résistantes produisent une protéine notée RORB. Reste à déterminer le rôle de cette molécule et le mécanisme de cette vulnérabilité.

Nature Neurosciences, 11 janvier 2020

DU POLYESTER EN ARCTIQUE

En 2016, l'équipe de Peter Ross, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, a réalisé des prélèvements d'eau entre 3 et 10 mètres de profondeur dans l'océan Arctique. Elle a détecté en moyenne 40 microparticules de plastique par mètre cube, dont 92 % sont des fibres synthétiques. Et le polyester représente 73 % de ces dernières. Ce résultat confirme l'ubiquité des pollutions aux microplastiques sur la planète.

Nature Comm., 12 janvier 2021

LE CŒUR VARIABLE DES DAUPHINS

Chez les mammifères, en particulier marins, le réflexe d'immersion en eau froide induit une bradycardie (une baisse anormale du rythme cardiaque), ce qui assure une meilleure gestion des réserves d'oxygène et limite les accidents de décompression avec la formation de bulles de gaz dans l'organisme lors de la remontée d'une plongée. Andreas Fahlman, de la société canadienne Global Diving Research, et des chercheurs de divers pays ont étudié ce phénomène chez le grand dauphin (*Tursiops truncatus*). Ce cétacé est capable d'adapter sa fréquence cardiaque en fonction de la durée anticipée de sa prochaine plongée. Les chercheurs ont observé que si l'animal prévoit une apnée longue, la baisse de sa fréquence cardiaque est plus rapide et plus importante que pour une apnée courte. ■

T. T.

A. Fahlman et al., *Frontiers in Physiology*, vol. 11, article 604018, 2020

ASTROPHYSIQUE

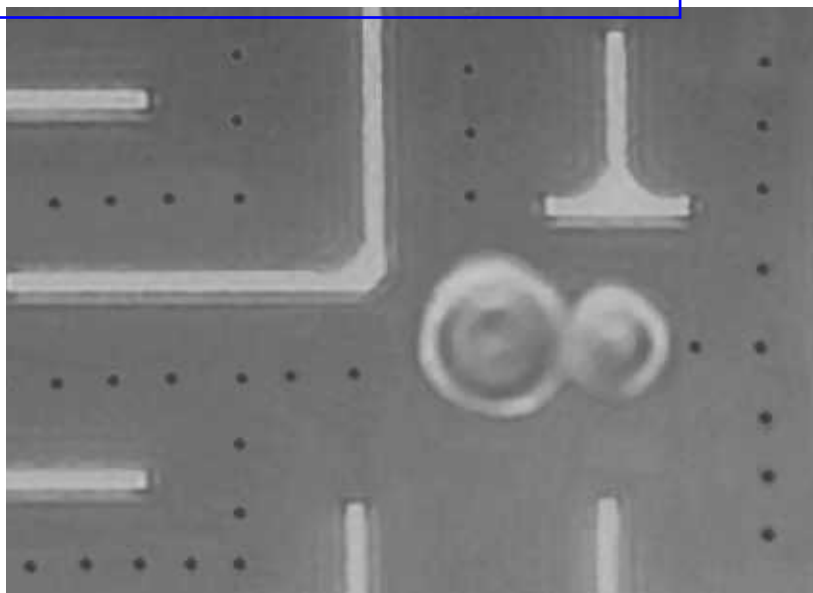
LA TEMPÉRATURE DES AMAS DE GALAXIES

Au cours de l'histoire cosmique, la matière s'est accumulée dans certaines régions de l'Univers sous l'effet de la gravité. Elle a formé de grandes structures où l'on trouve les galaxies et les amas de galaxies. Cette évolution conduit à une élévation de la température du gaz contenu dans ces régions. Brice Ménard, de l'université Johns-Hopkins, à Baltimore, et ses collègues ont utilisé l'effet Sunyaev-Zeldovich pour retracer cette histoire thermique. L'idée est d'analyser le fond diffus cosmologique (le rayonnement émis dans l'Univers primordial) et d'estimer l'énergie qu'il gagne quand il traverse des régions chaudes. Les chercheurs ont montré qu'il y a environ 10 milliards d'années, la température moyenne des amas était inférieure à 200 000 degrés. Elle est aujourd'hui de près de 2 millions de degrés. Ce facteur 10 était exactement prédit par le modèle cosmologique standard. ■

S. B.

Y.-K. Chiang et al., *The Astrophysical Journal*, vol. 902, article 56, 2020

UN PAC-MAN MICROFLUIDIQUE



La grande goutte se déplace dans le labyrinthe à la façon de Pac-Man en absorbant de petites gouttelettes placées devant. Elle peut aussi capter des particules solides présentes sur son chemin.

Contrôler le déplacement de gouttes de quelques micromètres de diamètre est loin d'être simple. Jana Chaaban, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, et ses collègues se sont inspirés de Pac-Man, célèbre jeu vidéo des années 1980, pour y parvenir. L'idée consiste à placer une gouttelette (dite « fille ») assez près de la goutte « mère », de sorte que les deux fusionnent. À cette échelle, la tension superficielle domine et la goutte résultante retrouve une forme circulaire. Son centre de gravité se trouve décalé par rapport à celui de la goutte mère initiale. La goutte a ainsi « fait un pas » ! En répétant l'opération et en décalant à chaque fois la position de la gouttelette fille déposée, on fait ainsi se déplacer une goutte sur le support, dans une direction arbitraire.

Mais la maîtrise du processus pour des gouttes de cinq micromètres de rayon est plus difficile qu'elle n'en a l'air. La difficulté principale vient de l'évaporation très rapide des petites gouttes. Les chercheurs ont modélisé la coalescence des deux gouttes et étudié l'influence de l'évaporation. Ils ont alors déterminé la fréquence de dépôt des gouttelettes pour que la goutte mère garde, cycle après cycle, la même masse : la goutte gagne autant de matière dans une fusion qu'elle en perd par évaporation entre deux coalescences.

Forts de ces données, les chercheurs ont alors conduit une goutte entre les murs d'un labyrinthe. Un véritable Pac-Man miniature ! Jana Chaaban et ses collègues envisagent aussi de nombreuses applications plus sérieuses : de tels mouvements de gouttes pourraient notamment être utilisés dans des « laboratoires sur puce », pour aider à réaliser des réactions chimiques ou transporter de petites quantités de matériau en microfluidique. ■

LUCAS GIERCZAK

J. Chaaban et al., *Physical Review Letters*, vol. 5, article 123602, 2020

BIOLOGIE

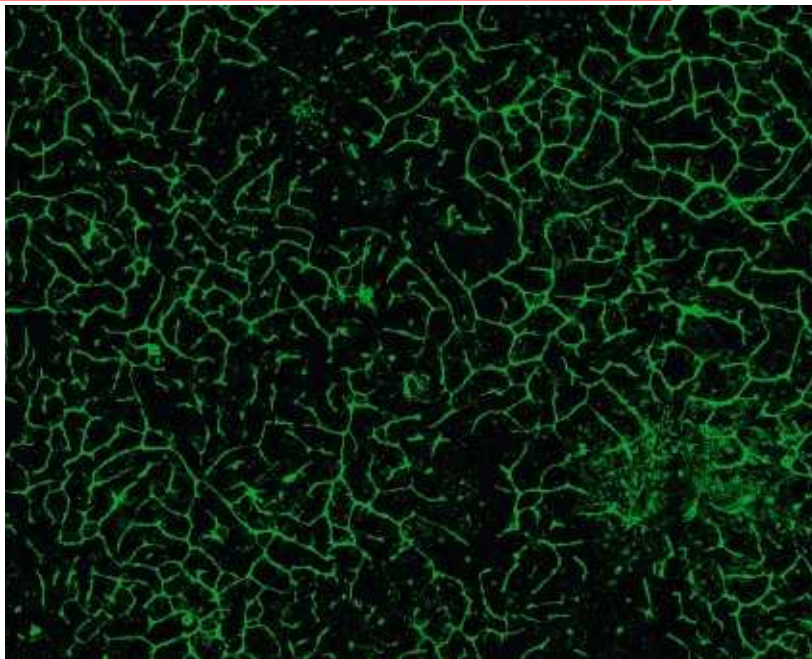
UN ORGANOÏDE DE FOIE DÉVELOPPÉ GRÂCE À L'IA

Un programme d'apprentissage automatique couplé à des manipulations génétiques a permis de recréer un organoïde fonctionnel se rapprochant d'un foie adulte.

Les organoïdes de foie, de cerveau, d'intestin, etc. représentent depuis quelques années un espoir pour l'étude des maladies et pour les transplantations. L'idée consiste à placer des cellules souches pluripotentes humaines dans des conditions spécifiques de façon à obtenir *in vitro* une structure reproduisant les tissus d'un organe donné. La technique a beaucoup progressé, mais la maturation des organoïdes est encore incomplète et aboutit à des tissus immatures, mal vascularisés ou aberrants. Jeremy Velazquez et ses collègues de l'université de Pittsburgh, aux États-Unis, viennent de lever partiellement cette difficulté en contrôlant cette différenciation des cellules souches non par des facteurs extérieurs, mais par une manipulation génétique déterminée à l'aide d'un programme d'intelligence artificielle.

Le programme d'apprentissage automatique utilisé par les chercheurs a analysé des données de l'expression des gènes dans 107 foies adultes. Il a ainsi établi une «identité tissulaire» de foie, puis a défini les cibles optimales pour moduler l'expression des gènes nécessaires à cette identité tissulaire. Les chercheurs ont ensuite mis en œuvre ces instructions en utilisant notamment la technique CRISPR-Cas9. Ils ont ainsi réalisé les manipulations génétiques sur des cellules fœtales de foie qu'ils avaient précédemment dérivées de cellules souches pluripotentes humaines.

En ciblant et en surexprimant juste trois gènes, Jeremy Velazquez et ses collègues ont obtenu un tissu qui contient, tout comme le foie adulte, plusieurs types cellulaires : des hépatocytes, mais aussi des cellules biliaires, des cellules endothéliales pour la vascularisation sanguine et d'autres cellules dites «stellaires» présentes dans le parenchyme du foie. Les biologistes ont vérifié que les signatures aberrantes d'expression génique, par exemple d'intestin, qui étaient jusqu'ici toujours présentes dans ce type de manipulation pour obtenir du foie, disparaissent. Très clairement, le tissu se spécialise en foie : il exprime *in vitro* des protéines spécifiques de cet organe, comme l'albumine, et remplit des fonctions hépatiques telles que le stockage de glycogène ou la



Dans les parties les plus matures de l'organoïde, des capillaires sanguins (en vert) irriguent les tissus caractéristiques du foie.

production biliaire, même si l'on ne peut assimiler totalement l'organoïde en question à un foie adulte.

Lors de la transplantation de ces organoïdes chez un modèle de souris souffrant de dommages au foie, les chercheurs ont constaté une connexion avec la vascularisation murine, la production d'albumine humaine et surtout une amélioration de la survie de ces souris. Ces travaux ouvrent ainsi de nombreuses perspectives. En effet, comme on pourrait prélever les cellules souches chez le patient, il serait à la fois possible de contourner les problèmes de rejet de greffe et d'accéder plus rapidement à des organes disponibles. Si l'obtention d'organes fonctionnels *in vitro* semble à portée de main, il reste encore, entre autres, à s'assurer que ces cellules ne présentent pas d'altérations génétiques dues à la manipulation qu'elles ont subie. ■

NOËLLE GUILLON

J. J. Velazquez et al., *Cell Systems*, en ligne le 7 décembre 2020

NÉANDERTAL ET SES MORTS

On sait qu'*Homo neanderthalensis* pêchait, peignait... Il est de plus en plus probable qu'il enterrait aussi certains de ses morts. Plusieurs sites le montrent déjà: en Iraq, dans la grotte de Shanidar et sa «tombe aux fleurs», ou en France, à la Chapelle-aux-Saints. Maintenant, une équipe de paléoanthropologues dirigée par Antoine Balzeau, du Muséum national d'histoire naturelle, et Asier Gómez-Olivencia, de l'université du Pays basque, a analysé grâce à diverses techniques le site de La Ferrassie, un abri-sous-roche situé en Dordogne et connu des archéologues depuis la fin du XIX^e siècle. Les chercheurs ont montré, grâce à une convergence de résultats, qu'un Néandertalien y a été volontairement enterré par les siens il y a environ 41 000 ans. ■

W. R.-P.

A. Balzeau et al., *Scientific Reports*,
vol. 10, article 21230, 2020

ÉPIDÉMIOLOGIE

LES LIEUX DU CORONAVIRUS

On suspectait les repas en famille ou entre amis de représenter un risque important de contamination (absence de masque, discussions rapprochées) par le virus du Covid-19. Plusieurs études, américaines et chinoises, suggéraient notamment des risques accentués lors de la fréquentation de restaurants et de bars. Pour préciser cette situation, près de 25 000 personnes (non soignantes) atteintes du Covid-19 pendant la période du couvre-feu en France en octobre 2020 ont répondu à un questionnaire de l'institut Pasteur. Près de 44% des personnes infectées connaissaient la personne source de leur infection. Quand la contamination s'est faite hors du foyer (65% des cas quand la personne source est connue), elle a surtout eu lieu dans le cercle familial (33%), dans le milieu professionnel (29%) et dans le milieu amical (21%). Les données confirment les résultats précédents, en particulier le fait que les repas ont joué un rôle notable dans la propagation du virus. ■

S. B.

Étude ComCor,
http://bit.ly/PLS520_ComCor

COMMENT LE RÉMORA SURFE SUR LA BALEINE



Sur la queue de cette baleine bleue, on distingue un rémora qui y est fixé.

Les rémoras sont dotés d'une ventouse, à la place de la nageoire dorsale, qui leur permet de se fixer sur un hôte, par exemple un requin ou une baleine. Il existe peu d'informations sur la dynamique des rémoras sur leur hôte; en particulier, se placent-ils n'importe où sur la surface d'une baleine? Grâce à des films et à une simulation numérique du corps entier d'un cétacé et des écoulements de fluide lorsque celui-ci nage, Brooke Flammang, de l'institut de technologie du New Jersey, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que le rémora, tel le cycliste dans le peloton, se fixe aux endroits où la traînée est la plus réduite.

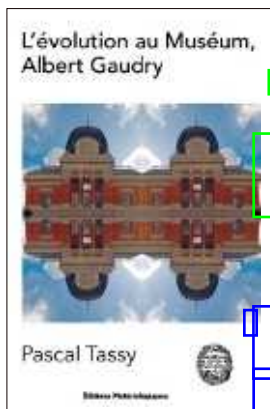
Dans certaines régions, derrière l'évent et la nageoire dorsale, la vitesse de l'écoulement est moindre. La traînée qui s'exerce sur les rémoras est alors jusqu'à 84% plus faible à ces endroits et dans leur sillage. Brooke Flammang et ses collègues ont également constaté que les rémoras se déplacent sur le dos des baleines. Les poissons bougent selon deux modes, «glissant» et «rasant». Dans le premier, le rémora garde le contact avec le cétacé grâce à la succion de sa ventouse et les frottements: il glisse le long du corps du mammifère marin. Dans le mode rasant, le poisson surfe à quelques centimètres au-dessus de la peau de la baleine. Les chercheurs suggèrent que cette proximité augmente la vitesse d'écoulement de l'eau entre les deux animaux. La baisse de pression qui s'ensuit à cet endroit (par l'effet Venturi) tend alors à maintenir le rémora proche de la baleine, sans que le poisson fasse d'effort supplémentaire. En utilisant ces modes de déplacement, les rémoras économisent leur énergie même si la baleine se déplace à des vitesses qui dépassent les cinq mètres par seconde. ■

S. B.

B. E. Flammang et al., *Journal of Experimental Biology*,
vol. 223, jeb226654, 2020

HISTOIRE DES SCIENCES

MÉDECINE



L'ÉVOLUTION AU MUSÉUM, ALBERT GAUDRY

Pascal Tassy
Éditions Matériologiques, 2020
252 pages, 23 euros

« J'ai lu le livre sur l'Origine des espèces avec une admiration passionnée... je le dégustai lentement comme on boit à petits traits une délicieuse liqueur. » C'est ainsi que le paléontologue Albert Gaudry (1827-1908) relate sa lecture de l'œuvre de Darwin, qu'il fut l'un des premiers à défendre en France. Cette lecture éblouie, le paléontologue et systématicien Pascal Tassy en a retrouvé la trace vivante dans les annotations de la main de Gaudry sur son exemplaire personnel de *L'Origine des espèces*, lu en 1863 dans la traduction de Clémence Royer.

Malgré l'hostilité de ses collègues du Muséum de Paris, Gaudry fut le premier à construire des arbres évolutifs des vertébrés fossiles sur le modèle du schéma arborescent de Darwin. Il fit construire (en 1898) la galerie de paléontologie du Muséum pour mettre en scène sa vision de l'évolution des êtres vivants et finit sa vie couvert d'honneurs et directeur de l'institution où il fit toute sa carrière. La moindre contradiction de ce « révolutionnaire académique » ne fut pas d'être un darwinien spiritualiste, dont la « philosophie paléontologique » s'attarde sur l'harmonie du monde et la création divine continuée qui y est à l'œuvre.

L'exploration de l'œuvre de Gaudry, de sa pensée et de son contexte est ici l'occasion d'une réflexion nuancée sur la conjoncture scientifique française au tournant du xx^e siècle. Elle est aussi l'occasion d'une mise au point sur ce que l'on peut définir comme « darwinisme », sur la notion de filiation, sur l'établissement des arbres et des taxinomies phylogénétiques, sur la notion de progrès. Ce livre lumineux et riche, de l'un de nos meilleurs penseurs de l'évolution, offre, en même temps qu'une passionnante biographie intellectuelle, une profonde méditation sur la paléontologie évolutive, ses principes, ses concepts et son histoire.

CLAUDINE COHEN
DIRECTRICE D'ÉTUDES À L'EHESS ET À L'EPHE, PARIS



LA VAGUE. L'ÉPIDÉMIE VUE DU TERRAIN

Renaud Piarroux
CNRS Éditions, 2020
240 pages, 17 euros

Il était une fois un épidémiologiste chevronné, qui s'est colleté avec les épidémies de par le monde. Un jour, il monte de Marseille à Paris, peu avant l'arrivée du Covid-19. La France sera-t-elle à l'abri d'une pandémie grâce à ses plans de préparation et son système de santé, l'un des plus performants au monde? C'est ce que croit sincèrement l'auteur en février 2020. Mais quelque chose lui dit que la pandémie va arriver et, plus inquiétant, il découvre que, si la vague est forte (d'où le titre), elle risque de submerger un bateau dont l'équipage n'est pas vraiment à la manœuvre. Notre docteur se transforme en lanceur d'alerte, apte par son charisme et ses compétences à mobiliser agences sanitaires et directions hospitalières.

Son journal de bord, un vrai suspense, embarque le lecteur dans la houle des débats que suscite son plaidoyer vibrant pour une action de terrain, à l'écoute des virus et... du peuple: toute stratégie sanitaire, qu'il s'agisse de « tester, tracer, isoler » ou ensuite de « tester, alerter, protéger », doit être justifiée scientifiquement, cohérente, applicable et surtout... appliquée. Dès le confinement, Renaud Piarroux improvise un programme d'accompagnement des mesures sur place avec des équipes mobiles, le Covisan, qui s'étend non sans remous à une partie du territoire.

L'épidémiologiste applique la leçon de son expérience outre-mer: aller au contact des hommes avec les moyens du bord. La leçon est simple, mais la « métamorphose » de nos institutions sera-t-elle durable? Un virus ne suffit pas à faire le printemps. Pourtant, l'enthousiasme de Piarroux est contagieux et son optimisme persuasif. Bref, une lecture idéale pour prendre les bonnes résolutions quand vient l'année nouvelle.

ANNE-MARIE MOULIN
LABORATOIRE SPHERE, CNRS-UNIVERSITÉ DE PARIS



L'HOMME PRÉHISTORIQUE EST AUSSI UNE FEMME

Marylène Patou-Mathis

Allary, 2020

352 pages, 21,90 euros

Est-ce un essai ou un pamphlet? Difficile à dire, tant l'autrice met de vigueur et d'enthousiasme pour nous convaincre de la nécessité d'envisager la préhistoire au prisme du genre. S'aventurant sur un terrain déjà défriché en France par Françoise Héritier et largement labouré par Claudine Cohen, elle s'efforce d'enfoncer le dernier clou du cercueil des idées sexistes troublant notre vision de ces époques lointaines. Après les avoir passées en revue, elle montre à quel point les anciennes inepties sur la prétendue infériorité féminine ont pu influencer les préhistoriens. Elle se fait la défenseuse de l'archéologie du genre en rappelant une vérité première: rien ne prouve que les chasseurs, les artistes, les tailleurs préhistoriques furent seulement des hommes; rien ne prouve non plus que cela n'a pas été le cas...

Emportée par sa fougue, Marylène Patou-Mathis va parfois très vite quand elle accorde du crédit à des théories controversées, comme la mesure des proportions des doigts des empreintes de mains négatives, censées prouver que les artistes des cavernes étaient aussi des femmes. Mais elle lutte également contre d'autres inepties, par exemple s'agissant du prétendu «matriarcat originel», qui est autant un mythe scientifique que le patriarcat, tout cela résultant d'une confusion entre règles de filiation et pouvoir politique.

Elle martèle enfin qu'«aucune preuve archéologique n'exclut la participation des femmes aux activités économiques, sociales et culturelles dans les sociétés du Paléolithique, période qui s'étend sur plusieurs centaines de millénaires». C'est une évidence pour les préhistoriens contemporains, de sorte que l'idée que nous serions «à l'aube d'une révolution» conceptuelle sur le sujet est pour le moins contestable au vu des travaux des jeunes chercheurs. Cela n'empêche pas ce livre d'être une bonne introduction sur un sujet majeur.

ROMAIN PIGEAUD

CHERCHEUR ASSOCIÉ AU CREA-H,
CNRS-UNIVERSITÉ DE RENNES

BLEU UN OcéAN DE SOLUTIONS

Maud Fontenoy
et Yann Arthus-Bertrand

Belin, 2020

208 pages, 29,90 euros

Les océans, ce sont les deux tiers encore méconnus de notre planète.

La liste des services, vitaux pour certains, qu'ils rendent chaque jour à l'humanité semble sans fin. En offrir le panorama complet dans un seul livre, de façon intelligible par tous, est un défi. Ici, Maud Fontenoy et Yann Arthus-Bertrand ont déployé des trésors de pédagogie, de documentation et de synthèse pour livrer en un seul volume un condensé de l'histoire de notre relation à la mer, sans laquelle la Terre ne serait pas peuplée d'humains. Rendre cette somme d'informations compréhensible et mémorisable est l'une des prouesses accomplies. Les images prises du ciel permettent de prendre de la hauteur; elles révèlent la beauté du monde marin, mais aussi les enjeux d'aujourd'hui et de demain.

Au fil des pages, ce n'est pas seulement la façon dont les océans permettent aux humains de respirer, boire, manger, se soigner, extraire de l'énergie et des matériaux ou voyager qui est détaillée. Si une image «vaut mille mots», l'alliance des mots et des images offre ici la possibilité de s'imprégner des services rendus, mais aussi des menaces alarmantes que les activités humaines font peser sur le monde du silence.

Plus important, les auteurs ne s'arrêtent pas à ces constats, certes nécessaires et porteurs de craintes légitimes: ils s'attachent à souligner, à chaque étape, les solutions existantes ou envisagées pour rétablir un équilibre durable dans notre rapport aux mers. L'esthétique et la pédagogie sont réunies dans ce livre, qui rappelle combien nous dépendons des océans et combien ce que nous en faisons conditionne notre futur.

SOPHIE ARNAUD-HAOND
IPREMER, STATION DE SÈTE



L'OR VERT

Agnès Guillot et Jean-Arcady Meyer

CNRS, 2020

224 pages, 23 euros

Les auteurs ont fait carrière en robotique bio-inspirée. Ils nous parlent ici de bâtiments en forme de diatomées, de procédés sol-gel que ces microalgues ont permis d'imaginer, de stratégies algorithmiques apparentées à celles mises en œuvre par les plantes, des feuilles de haricots efficaces dans la chasse aux punaises, ou encore des champignons introduits dans l'encre des imprimantes 3D. Tout cela est bien écrit et montré. Un beau petit livre inspirant.

LE GRAND LIVRE DES ARBRES ET DE LA FORÊT

Y. Birot, G.-H. Florentin, J.-Y. Henry et B. Roman-Amat (dir.)

Odile Jacob, 2020

336 pages, 24,90 euros

Les forêts couvrent environ 30 % du territoire français métropolitain. Tous leurs usagers voudraient qu'elles soient consacrées à leur seul bénéfice, mais les forêts doivent servir de multiples intérêts. Trente-deux membres de l'Académie d'agriculture de France et experts extérieurs ont rédigé 43 articles, presque des fiches, pour les passer en revue. Le style est sec, mais les données sont solides et le panorama offert est assez complet: climat, énergie bois, risques, écologie, santé humaine, faune...

LES RÉVOLTES DU CIEL

Jean-Baptiste Fressoz et Fabien Locher

Seuil, 2020

320 pages, 23 euros

Les deux auteurs, historiens, ont remarqué que la conviction que l'humanité pouvait agir sur le climat a marqué les sociétés européennes depuis des siècles. Ils alignent ici 16 manifestations de ce trait culturel, allant de la vieille idée que le climat façonnerait les hommes et le destin de leurs civilisations, à la circulaire n° 18 de 1821 ordonnant aux préfets de France une enquête sur «la multiplication des refroidissements» ou aux surprenantes premières réflexions sur le cycle du carbone et les premiers liens entre le CO₂ et la température du globe. Manifestement, l'idée d'agir ensemble pour protéger le climat n'est pas nouvelle et constitue aussi depuis longtemps un instrument de gouvernement.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

DE L'INFORMATIQUE À LA MÉTAPHYSIQUE

Distinguer l'objet en soi de ses diverses incarnations
~~est l'une des clés de la pensée informatique.~~



Avant d'être publiée, cette chronique a subi de multiples transformations. Elle est passée entre plusieurs mains et a été enregistrée sur différents supports. Mais elle est restée le même objet en soi.

Quand nous écrivons un texte à plusieurs avec un logiciel de traitement de texte, ce texte se construit peu à peu, mais surtout il change en permanence de localisation et de forme.

Il est par exemple d'abord localisé sur le disque de l'ordinateur de l'un des auteurs, puis sur une clé, puis sur le disque de l'ordinateur d'un autre auteur. Il peut être découpé en paquets, pour être acheminé par le réseau Internet, puis reconstitué à l'arrivée. Il est peut-être aussi localisé dans les «nuages», quand nous utilisons un système de partage de fichiers. Il peut être imprimé sur une feuille de papier, sur laquelle des corrections sont apportées à la main. Il est parfois commencé avec un logiciel, puis achevé avec un autre. Il peut être commencé dans une police de caractères, puis fini dans une autre. Son format – c'est-à-dire la manière dont chaque lettre est représentée par un nombre – peut également changer au cours de la rédaction. Des auteurs travaillent parfois en parallèle

sur différentes parties du texte, avant de réconcilier leurs versions divergentes. Il peut aussi être mis en page, par l'un des auteurs ou par un maquettiste. Et il sera sans doute encore transformé au moment de sa diffusion.

En métaphysique, «noumène» et «phénomène» distinguent l'objet en soi de ses diverses manifestations

Rien n'est donc constant au cours de la rédaction de ce texte: ni sa localisation dans l'espace, ni sa forme matérielle – tour à tour, électrons et trous dans un semi-conducteur, taches d'encre sur une feuille de papier, ondes électromagnétiques, etc. –, ni même sa forme numérique – la façon dont il est exprimé sous la forme

d'une suite de nombres, indépendamment de leur matérialisation.

Pourtant, malgré sa labilité, le texte reste, au cours de ses métamorphoses, un seul et même objet, et nous en parlons comme d'un «un» texte, et surtout pas comme de plusieurs textes, ici et là. Nous devons donc supposer l'existence d'un objet, le texte en soi, qui n'est ni électrons et trous, ni taches, ni ondes, etc., mais qui peut s'incarner, se manifester à notre sensibilité, sous la forme de telles entités.

Comprendre que cet objet existe est l'une des principales difficultés de l'apprentissage de la pensée informatique, car les débutants confondent souvent le texte avec l'une de ses incarnations, généralement parmi les plus visibles, de même qu'ils confondent algorithme et programme, ordinateur et écran... De ce fait, ils peinent à comprendre les enjeux du choix entre la circulation du texte par courrier et l'utilisation d'un système de partage de fichiers, puisque, pour eux, le texte est une icône sur le bureau de leur ordinateur.

Ce type de confusion ne posait, en revanche, aucun problème quand les objets étaient moins mouvants: pour l'homme du ^{xx}e siècle, le mot «disque» désignait, sans malentendu, à la fois un ensemble de pièces de musique et son incarnation sous la forme d'un objet en copolymère de chlorure et d'acétate de vinyle.

Cette distinction entre l'objet en soi et la façon dont il se manifeste à notre sensibilité est une vieille distinction de la métaphysique, qui désigne parfois ces concepts par les mots «noumène» et «phénomène». Elle est omniprésente en informatique. Elle permet également, par exemple, de distinguer les propriétés intrinsèques d'un algorithme de celles des divers programmes qui l'incarnent.

Ces concepts de la métaphysique, jadis savants et dont l'utilité était parfois mise en doute, sont devenus quotidiens, car ils permettent, en informatique, de poser les questions au bon niveau d'abstraction. ■

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

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA

SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
PAPIERFORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIEFORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

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 :

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

PAG21STD

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

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisais mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

N°: Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

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

Signature obligatoire:

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 papier79€
Au lieu de 114,40€☐ FORMULE
INTÉGRALE• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne99€
Au lieu de 174,40€PAPIER
PAPIER + HORS-SÉRIE
PAPIER + HORS-SÉRIE + INTÉGRALE

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

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

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

ARMÉE DE PLUMES POUR GUERRES FUTURES

L'armée française mobilise des personnalités du monde de la science-fiction pour anticiper les conflits des prochaines décennies.



Se préparer à l'inimaginable: tel est le pari ambitieux du ministère français des Armées officialisé le 4 décembre dernier au Forum innovation défense par la présentation de sa Red Team, qui réunit une dizaine d'auteurs, scénaristes ou concepteurs de science-fiction collaborant avec des experts. Pilotée par l'université PSL (Paris, Sciences et Lettres), cette équipe a pour feuille de route de concevoir des formes inattendues de menaces mettant l'armée en péril et susceptibles de se produire d'ici à 2060. La littérature d'anticipation peut-elle améliorer la confiance collective dans le futur en nous y préparant?

Si l'initiative est surprenante, le principe n'est pas nouveau. L'expression «Red Team» désignait les forces du bloc de l'Ouest qui, pour s'entraîner, créaient des unités imitant les forces communistes symbolisées par leur drapeau rouge. Détachée aujourd'hui de cette connotation géopolitique, sa finalité générale est d'aider une organisation à améliorer sa capacité d'adaptation à des conditions défavorables, en imaginant par anticipation les stratégies ennemies.

Entre la création débridée du scénariste et la discipline hiérarchique du militaire, difficile de ne pas voir l'alliance de la carpe et du lapin. C'est pourtant oublier que l'écrivain visionnaire Isaac Asimov collabora avec l'armée états-unienne sur un projet d'antimissile balistique à la fin des années 1950, que d'autres plumes furent aussi convoquées sous l'administration Reagan ou au lendemain des attentats du 11-Septembre pour imaginer des menaces

Ces expériences de pensée portent aussi sur les valeurs collectives en jeu dans la société

futures. On ne saurait sous-estimer la portée épistémologique de cette union qui n'a de contre-nature que l'apparence.

Le politologue Yannick Rumpala, de l'université de Nice, a mis en exergue l'apport de l'imagination fictionnelle dans la production de connaissances

répondant à des contextes à haut degré d'incertitude. Ainsi, avec ses westerns intersidéraux des années 1960, le *space opera* a anticipé la militarisation de l'espace, tandis que les mondes informatisés du cyberpunk grouillant de hackers ont montré que le cyberspace était un théâtre d'opérations guerrières où se joue la souveraineté de communautés à travers des interfaces homme-machine.

Bien au-delà d'une prospective technologique sur les systèmes d'armes ou d'une spéculation autour de stratagèmes opérationnels, les hypothèses de la fiction sont des constructions de mondes, des champs d'expériences qui visent, avant de définir les zones de conflictualité et le profil psychologique de l'assaillant, à décrire la façon dont ils se déploient et sont perçus dans le monde. Ces expériences de pensée envisagent la nature et l'évolution des conflits, mais aussi les valeurs collectives en jeu dans une société où, par exemple, la dépendance aux technologies numériques serait maximale.

Ainsi, des dispositifs publics peuvent avoir des effets inattendus sur les garanties de l'État de droit, telles que les libertés publiques. Par exemple, la Red Team a imaginé une organisation sociale en 2040 où chaque individu serait équipé d'une puce contenant l'ensemble de ses informations administratives, sanitaires et civiles. Ces générations deviendraient incapables de jouir de ces libertés sans la traçabilité de leurs données. Devenue principe de cohésion sociale, de sécurité et de bonne santé, la puce mettrait fin au concept d'État-nation fondé sur le territoire au profit d'une nouvelle organisation de la puissance publique.

En plaçant l'expérience sensible au cœur de la connaissance du monde et de ce qui fait société, le croisement entre fiction et prospective s'inscrit dans la tradition philosophique de l'empirisme. Expérimenter les incertitudes technologiques et géopolitiques, c'est aussi reconnaître qu'il est possible d'agir sur le futur. Un premier pas vers la confiance? ■

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



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

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

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



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

Stimuler le pouvoir de réparation du cerveau

L'ESSENTIEL

➤ Trois approches sont expérimentées pour réparer les tissus cérébraux endommagés : transplanter des cellules souches dans les régions lésées, utiliser les cellules produites par le cerveau (par exemple en transformant des cellules gliales en neurones) et stimuler la croissance des nerfs.

➤ Des résultats prometteurs ont été obtenus pour le traitement des maladies de Parkinson, d'Alzheimer et de Huntington, mais pour l'instant chez l'animal.

➤ Chez l'humain, des tests sont en cours avec des patients parkinsoniens et paraplégiques.

L'AUTEUR



JANOSCH DEEG
journaliste
scientifique
à Heidelberg

Après un accident ou une pathologie, les neurones se régénèrent à peine. Trois approches très différentes sont à l'étude pour stimuler la neuroplasticité, avec l'espoir de soigner un jour des maladies comme celles d'Alzheimer ou de Parkinson, ainsi que les paraplégies.

Une blessure profonde entaillait le cerveau. Mais en seulement quelques jours, la zone lésée a complètement guéri. Impossible même d'y détecter la moindre trace de cicatrice... Malheureusement, cette histoire ne concerne pas un patient humain, mais un poisson-zèbre. Ces animaux peuvent régénérer leurs cellules nerveuses et rétablir ainsi la fonctionnalité des réseaux neuronaux. De nombreux autres poissons et certaines espèces de salamandres en sont aussi capables.

DES DÉFICITS PERMANENTS

Chez l'humain, en revanche, les lésions du système nerveux central et les maladies neurodégénératives provoquent généralement des déficits graves et permanents. Une rupture de la moelle épinière entraîne ainsi une paralysie, tandis que les accidents vasculaires cérébraux, qui détruisent une partie du tissu nerveux, laissent souvent derrière eux des troubles de la parole ou une perte de capacités cognitives. Même si certains patients ont la chance de voir leurs déficiences diminuer en partie ou complètement avec le temps, à mesure que les réseaux neuronaux se restructurent...

Ce n'est que dans le système nerveux périphérique, au niveau notamment des bras ou des jambes, que le corps humain parvient à former de nouvelles fibres et ainsi à restaurer les tissus légèrement lésés. Dans le cerveau et la moelle épinière, des substances inhibitrices empêchent la croissance de ces fibres. Les experts

attribuent cette propriété à la complexité du réseau cérébral, où trop de nouvelles connexions risqueraient selon eux de semer le chaos.

Au-delà des fibres nerveuses, le cerveau produit aussi régulièrement de nouveaux neurones, même à l'âge adulte – on parle de neurogenèse. Mais ces renforts potentiels sont à peine utilisés à des fins de réparation, que ce soit chez l'humain ou chez les autres mammifères. Leur existence est une découverte récente: jusque dans les années 1990, la communauté scientifique pensait notre système nerveux central incapable de recréer des neurones après un certain âge. Depuis, les recherches ont montré que le cerveau adulte renferme des cellules souches dites «neurales», susceptibles de se transformer en neurones fonctionnels et de s'intégrer dans les circuits existants. Cette neurogenèse adulte ne se produit toutefois que dans quelques régions bien précises, les «niches» des cellules souches (voir l'encadré page 26).

On sait encore peu de chose sur le rôle de ces jeunes neurones, mais la simple découverte que le système nerveux humain semble capable de les intégrer à ses réseaux est d'une grande importance. Elle signifie qu'il existe, dans le cerveau et la moelle épinière, des mécanismes qui peuvent, en principe, réparer les tissus nerveux détruits. La question est alors la suivante: comment les mobiliser davantage? Autrement dit, la neurogenèse est-elle exploitable pour soigner les lésions cérébrales?

C'est en tout cas ce à quoi travaille Magdalena Götz, professeuse à l'université ➤

> Ludwig-Maximilian et directrice de l'Institut de recherche sur les cellules souches du centre Helmholtz, à Munich, depuis qu'elle a commencé sa carrière de chercheuse, au début des années 1990. Elle étudie notamment ce qui distingue les niches de cellules souches neurales des autres régions du cerveau. À terme, son objectif est de transformer les zones blessées en de telles pépinières de neurones.

FAIRE ÉCLORE DES PÉPINIÈRES DE NEURONES

Dans une étude publiée en 2020, Magdalena Götz et ses collègues ont analysé toutes les protéines présentes dans la plus grande niche de cellules souches du cerveau, la zone dite « sous-ventriculaire ». Les chercheurs ont trouvé une enzyme essentielle pour réguler la création de nouvelles cellules nerveuses. Elle contribue à rigidifier le tissu cérébral, habituellement souple, ce qui semble important pour la formation des neurones. Cependant, on en sait encore trop peu sur ce processus pour le déclencher spécifiquement là où il serait nécessaire.

D'autres chercheurs tentent plutôt de détourner les jeunes neurones de leur lieu de naissance et de les guider vers la zone blessée. Mais le problème est alors que les neurones qui parviennent à destination meurent le plus souvent une fois arrivés. Ce que Magdalena Götz explique de façon simple : « Ce ne sont probablement pas les bonnes cellules nerveuses. » En effet, les neurones sont très variables selon la

région du cerveau, de sorte que la maladie de Parkinson, par exemple, attaque des cellules nerveuses spécifiques, différentes de celles atteintes dans la maladie d'Alzheimer ou un accident vasculaire cérébral. Pour qu'ils s'intègrent dans les zones lésées, les nouveaux neurones devraient d'abord être transformés pour donner les types requis. « Actuellement, il n'y a pas de solution en vue », déplore Magdalena Götz.

En revanche, le poisson-zèbre, dont nous avons déjà parlé, n'a aucun problème pour former de nouvelles cellules nerveuses et les intégrer à ses réseaux. Les neurobiologistes l'étudient donc depuis des décennies, afin d'identifier les mécanismes et les molécules clés de la neurogenèse. Jovica Ninkovic, spécialiste de la plasticité du système nerveux à l'université Ludwig-Maximilian, et ses collègues du centre Helmholtz de Munich, tentent ainsi de comprendre comment le cerveau des poissons se régénère après une entaille provoquée par une lame. À cette fin, les chercheurs ont mis au point une méthode de microscopie utilisable pour observer la neurogenèse chez les animaux vivants.

CICATRISER N'EST PAS GUÉRIR

Comme chez les mammifères, les cellules dites « gliales » s'accumulent à proximité de la plaie. Mais chez le poisson-zèbre, « il est frappant de constater que les plaies se referment sans tissu cicatriciel quelques jours seulement

DE NOUVEAUX NEURONES TOUTE LA VIE

Jusqu'aux années 1990, les scientifiques partageaient le principe que tous les neurones étaient déjà formés chez l'embryon et qu'aucun nouveau ne se créait après la naissance. Ils l'expliquaient par la complexité du cerveau considéré si sensible que de nouveaux composants auraient risqué de le dérégler. Mais en 1965, Joseph Altman et Gopal Das, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), ont remis en cause cette idée : ils ont montré chez le rat que la production de nouveaux

neurones, ou « neurogenèse », se poursuivait dans le système nerveux adulte. Nous savons aujourd'hui, grâce à l'expérimentation animale, que cette production n'a lieu que dans quelques régions du cerveau, les niches des cellules souches. La plus grande est localisée dans la zone dite « sous-ventriculaire », adjacente au ventricule latéral, une cavité emplies de liquide céphalorachidien. De là, les cellules migrent vers le bulbe olfactif, à l'avant de l'encéphale, où elles se transforment en neurones adultes et s'intègrent au réseau cérébral. Les jeunes cellules sont très adaptables et influencent localement le traitement de l'information, semblant par exemple bénéficier à la mémoire à long terme. Autre découverte intéressante réalisée chez les rongeurs : l'activité mentale et physique stimule la neurogenèse.

Il est bien sûr impossible de réaliser le même type d'expériences chez l'humain, mais des chercheurs ont tout de même réussi à montrer que notre cerveau est lui aussi capable de produire de nouveaux neurones tout au long de la vie. La première preuve date de 1998 : une équipe américano-suédoise a examiné le tissu cérébral de patients cancéreux décédés, qui avaient reçu un médicament laissant des traces dans l'ADN des cellules nouvellement formées ; or ces marqueurs ont été retrouvés dans certains neurones. Lors d'analyses post mortem menées en 2010, Gerd Kempermann, du Centre allemand pour les maladies neurodégénératives, et ses collègues ont quant à eux identifié dans l'hippocampe une protéine spécifique, reconnue comme un marqueur de la neurogenèse chez l'animal.

À quel point cette production de neurones est-elle importante chez l'adulte ?

Des chercheurs ont réussi à le déterminer en examinant le cerveau de personnes décédées préalablement exposées à de fortes doses de rayonnement radioactif, par exemple à la suite d'essais nucléaires. Dans ce cas, la datation au radiocarbone permet en effet de savoir quand leurs neurones sont nés. Une étude de ce type, lancée en 2013, a conclu qu'environ 700 neurones se forment chaque jour dans l'hippocampe chez l'adulte. Ce qui correspond à une augmentation annuelle de 1,75 % du nombre de cellules nerveuses dans cette zone du cerveau.

J. Altman et G. D. Das, *J. Comp. Neurol.*, vol. 124, pp. 319-334, 1965; P. S. Eriksson et al., *Nat. Med.*, vol. 4, pp. 1313-1317, 1998; R. Knöth et al., *Plos One*, vol. 5, e8809, 2010; K. L. Spalding et al., *Cell*, vol. 153, pp. 1219-1227, 2013.

après la blessure», déclare Jovica Ninkovic. Et les chercheurs tentent d'en éclaircir la raison

– un enjeu d'importance, car les tissus cicatrisés nuisent au fonctionnement des réseaux neuronaux. D'après leurs résultats, cela s'expliquerait par les types particuliers de cellules gliales qui viennent réparer la blessure.

Pendant longtemps, les cellules gliales ont été très sous-estimées. *Glia* est un mot grec qui signifie «colle», et que l'on retrouve dans le terme «glu». Le médecin allemand Rudolf Virchow a découvert ces cellules en 1856 et les a nommées ainsi parce qu'il pensait qu'elles formaient une sorte de tissu de soutien passif pour les neurones. Ce n'est qu'au début des années 1980 que Helmut Kettenmann, aujourd'hui professeur de neurobiologie cellulaire à l'hôpital universitaire de la Charité, à Berlin, a compris que les cellules gliales ne sont pas seulement du tissu conjonctif, mais qu'elles réagissent aux messages neuronaux. Au tournant du millénaire, Magdalena Götz a mis en évidence une propriété encore plus étonnante: «Nous avons découvert que les cellules gliales se comportent comme des cellules souches et peuvent se transformer en neurones», explique-t-elle. Une découverte qui a fait grand bruit.

D'UNE PIERRE (PHILOSOPHALE) DEUX COUPS

Alors pourquoi ne pas convertir en neurones les cellules gliales, qui de toute façon se précipitent sur les sites blessés? Selon Magdalena Götz, cela permettrait de «faire d'une pierre deux coups»: on disposerait de nouvelles cellules nerveuses tout en empêchant la formation de cicatrices. La transformation des cellules gliales en neurones est déjà possible grâce à ce qu'on appelle des «vecteurs viraux» – des virus génétiquement modifiés qui pénètrent dans la cellule et la reprogramment. La technologie des vecteurs viraux est connue depuis les années 1970 et constitue aujourd'hui l'une des méthodes standard du génie génétique.

En 2005, Magdalena Götz et son équipe ont réussi pour la toute première fois à transformer des cellules gliales en neurones chez la souris. De nombreux autres succès ont suivi. «Nous sommes déjà capables d'obtenir certains types de neurones à partir de cellules gliales, mais pas encore d'autres», explique la chercheuse. Le grand défi consiste donc à s'assurer que les cellules se transforment en sous-types neuronaux appropriés et s'intègrent réellement à la zone endommagée. C'est la seule façon de parvenir à une véritable réparation du tissu nerveux. De premiers résultats ont été obtenus chez des souris ayant subi des lésions cérébrales: les cellules reprogrammées se sont liées aux autres et ont formé de nouvelles voies nerveuses.

Une équipe dirigée par Gong Chen, de l'université de Jinan, en Chine, a rapporté des



résultats similaires au printemps 2020, également chez la souris. Les chercheurs ont utilisé des cellules gliales transformées pour remplacer les neurones détruits par la maladie de Huntington. En provoquant la mort de cellules nerveuses, cette maladie héréditaire entraîne des perturbations motrices et se révèle fatale à terme. Grâce à des vecteurs viraux injectés dans la zone cérébrale touchée, les neuroscientifiques ont converti près de 80% des cellules gliales ciblées en neurones du type souhaité. Les perturbations motrices des souris malades traitées se sont alors améliorées et ces dernières ont vécu plus longtemps que les souris malades du groupe témoin.

UN ESPOIR POUR PARKINSON

Et les promesses de cette méthode ne se limitent pas à la maladie de Huntington: en juin 2020, l'équipe de Xiang Dong Fu, de l'université de Californie à San Diego, a réussi à atténuer des symptômes parkinsoniens chez la souris. Dans la maladie de Parkinson, les cellules productrices de dopamine meurent progressivement au sein de la substance noire (substantia nigra), une zone cérébrale essentielle au contrôle moteur. En conséquence, les patients perdent peu à peu la maîtrise de leurs muscles. Les chercheurs ont alors reprogrammé les cellules gliales des rongeurs pour les transformer en neurones producteurs de dopamine. Résultat: la concentration de cette substance a doublé dans le cerveau des animaux et ils se sont remis à bouger sans trembler ni manifester de faiblesse particulière. Ces découvertes font naître l'espoir d'utiliser un jour cette stratégie pour traiter la maladie de Parkinson et d'autres pathologies où les cellules nerveuses meurent. Même si «beaucoup >

Le poisson-zèbre semble former facilement de nouvelles cellules nerveuses, qui s'intègrent dans ses réseaux neuronaux. Parviendrons-nous un jour à l'imiter?

> de recherches sont encore nécessaires avant d'aboutir à une réelle application clinique», comme le nuance Magdalena Götz.

Une autre idée consiste à transplanter des **précurseurs de neurones**, obtenus à partir de cellules souches, dans les zones endommagées du cerveau. Selon leur environnement d'implantation, ces précurseurs peuvent ensuite former toutes sortes de cellules nerveuses différentes.

En 1992, deux équipes ont fait sensation quand elles sont parvenues à implanter de jeunes neurones dans le cerveau de patients atteints de la maladie de Parkinson. Mais si le tableau clinique des deux patients traités lors de la première expérience s'est considérablement amélioré, les résultats de la seconde équipe, qui a traité dix personnes, ont été mitigés. Néanmoins, l'euphorie était grande: on imaginait déjà la thérapie par cellules souches guérir non seulement les maladies neurodégénératives, mais aussi les lésions de la moelle épinière et les accidents vasculaires cérébraux! Les médecins l'utilisent d'ailleurs déjà avec succès pour traiter la leucémie, les brûlures ou les lésions du cartilage. Dans les premières expériences des années 1990, cependant, les cellules devaient être obtenues à partir de fœtus avortés – plusieurs fœtus étaient même nécessaires par patient parkinsonien. Ce qui a conduit un certain nombre de pays à ne pas autoriser cette méthode pour des raisons éthiques.

TRANSPLANTER DES CELLULES SOUCHES

Mais en 1998, des chercheurs ont réussi pour la première fois à cultiver des cellules souches embryonnaires et à les faire se multiplier en laboratoire. Et depuis 2006, une autre solution plus facilement acceptable d'un point de vue éthique est disponible: le médecin japonais Shinya Yamanaka a trouvé le moyen de transformer des cellules de peau en cellules souches. Les experts parlent de «cellules souches pluripotentes induites». Shinya Yamanaka a activé certains gènes qui jouent un rôle important lors du développement embryonnaire précoce, faisant ainsi reculer «l'horloge» des cellules de peau, qui sont retournées à leur état originel, celui de cellules souches. Il a reçu le prix Nobel de physiologie ou de médecine en 2012 pour cette méthode.

Bien que plusieurs centaines de patients parkinsoniens aient reçu une greffe de cellules souches à ce jour, la technique ne se développe que lentement. Dans certains cas, les cellules transplantées améliorent durablement les fonctions motrices, mais dans d'autres non, et on ignore pourquoi. En outre, le traitement est en général inefficace contre les autres symptômes de la maladie et cause parfois des effets secondaires graves, tels que des hallucinations ou des troubles du mouvement.

Pour d'autres pathologies neurodégénératives, comme la maladie d'Alzheimer, la thérapie par cellules souches est encore moins avancée. Cette maladie provoque également la mort de nombreux neurones, probablement à cause d'une mauvaise «élimination des déchets» dans le cerveau, et conduit à des perturbations cognitives de plus en plus graves. Par rapport à la maladie de Parkinson, la destruction des neurones est beaucoup plus étendue à travers le cerveau, ce qui complique la transplantation de cellules souches. Mais des

Plusieurs centaines de patients parkinsoniens ont reçu une greffe de cellules souches

expériences sur l'animal suggèrent tout de même que cette technique pourrait favoriser l'apprentissage et la mémoire chez les victimes de la maladie d'Alzheimer.

On cherche aussi à l'exploiter pour soigner les patients paraplégiques. En 2010, des médecins américains ont implanté environ deux millions de cellules précurseuses, provenant de cellules souches embryonnaires, dans la moelle épinière d'un étudiant de 21 ans, blessé lors d'un accident de voiture. C'était la première opération de ce genre et le résultat fut plutôt décevant. Quatre ans plus tard, son état et celui des quatre autres patients traités pour des blessures similaires ne s'étaient pas sensiblement améliorés. Un point positif tout de même: les cellules transplantées n'ont pas causé de cancer, ce qui était une inquiétude majeure des médecins.

Entretemps, plusieurs études auprès de personnes paraplégiques ont confirmé l'innocuité de la thérapie, mais sans fournir de résultats clairs sur l'évolution des fonctions motrices ou sensorielles. Les médecins ne signalent de légères améliorations que dans quelques cas. En 2020, après avoir passé en revue les recherches sur le sujet, une équipe dirigée par Susan Barnett, de l'université de Glasgow, a donc conclu que la méthode n'en est qu'à ses débuts et que d'autres travaux sont nécessaires pour déterminer son potentiel.

Une autre approche est étudiée depuis plus longtemps pour remplacer les cellules nerveuses endommagées – en fait, c'est la plus >

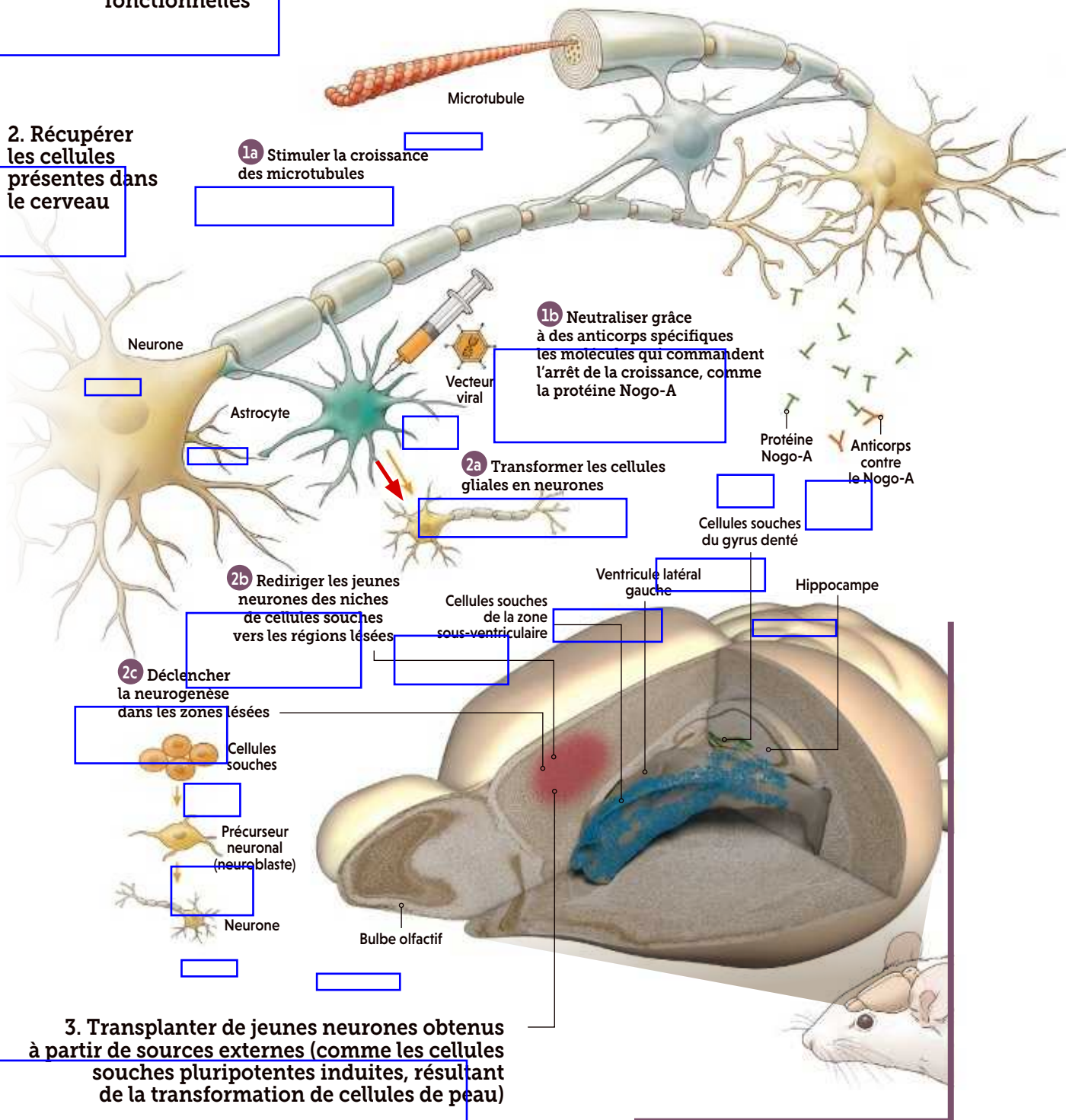
COMMENT RESTAURER LES RÉSEAUX NEURONAUX

Les neuroscientifiques travaillent sur plusieurs approches pour stimuler la régénération des neurones après une lésion. L'objectif est de guérir un jour les pathologies touchant le système nerveux central, comme la maladie d'Alzheimer ou la paralysie.

Les techniques à l'étude se divisent en trois catégories, selon qu'elles visent respectivement à restaurer les communications au sein du réseau préservé, à utiliser les cellules produites par le cerveau ou à transplanter de nouveaux neurones.

1. Rétablir les liaisons entre les cellules nerveuses fonctionnelles

2. Récupérer les cellules présentes dans le cerveau



3. Transplanter de jeunes neurones obtenus à partir de sources externes (comme les cellules souches pluripotentes induites, résultant de la transformation de cellules de peau)

> ancienne. Elle consiste à développer les connexions entre les neurones encore sains.

Dès 1900, les neuroscientifiques ont découvert que les cellules du système nerveux central sont capables de former de nouvelles fibres si elles disposent d'un environnement adapté. Ils l'ont montré chez l'animal en transplantant des tissus du système nerveux périphérique dans le cerveau ou la moelle épinière, dont les neurones ont alors développé de nouvelles connexions à travers ce nouveau tissu.

Reste que le système nerveux central a longtemps été considéré si complexe que ce type de croissance neuronale y était jugé impossible. C'est le neuroscientifique argentin-canadien Albert Aguayo qui, le premier, a mis fin à ce dogme dans les années 1970. Ses expériences chez l'animal ont confirmé les résultats du début du siècle.

LEVER LE FREIN DE LA CROISSANCE NEURONALE

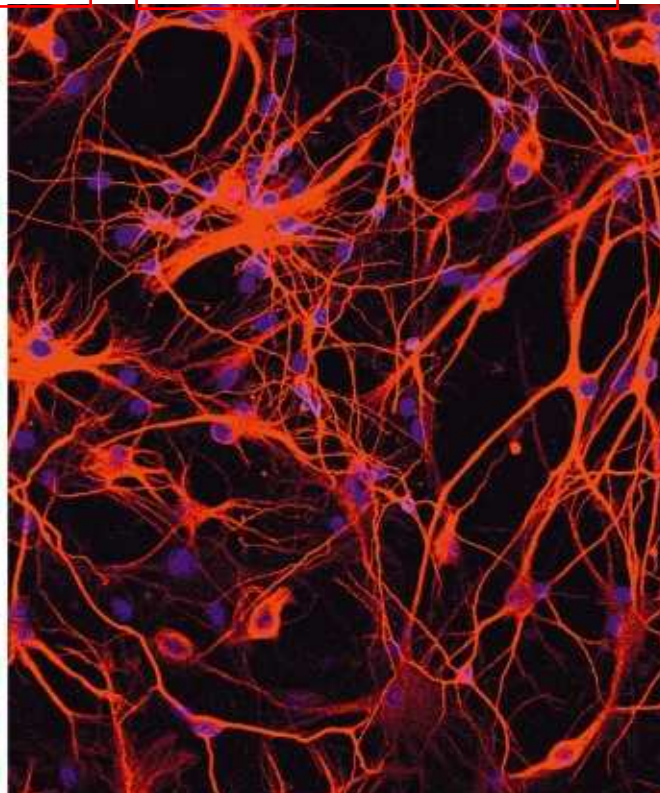
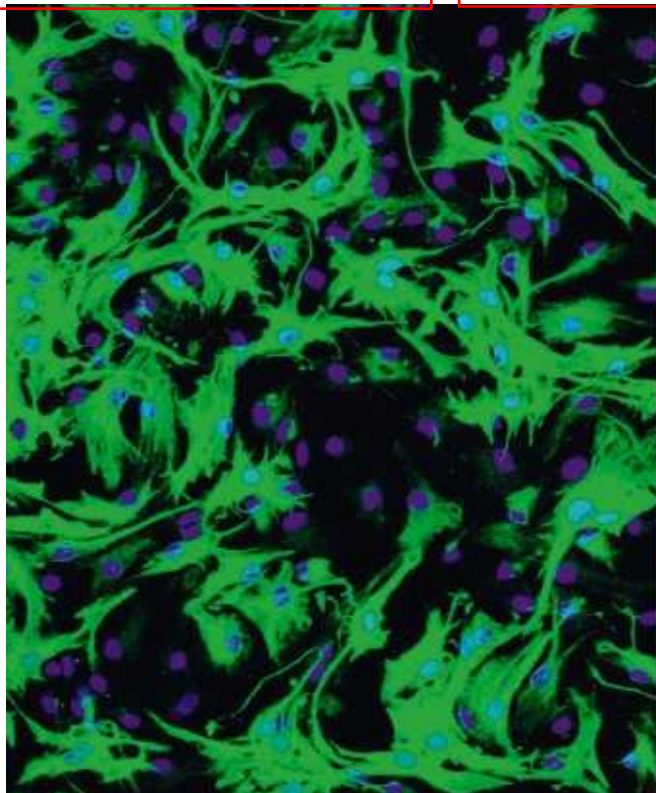
Les chercheurs ont par ailleurs découvert que des protéines appelées «facteurs neurotrophiques», ou «facteurs de croissance», poussent les neurones à former de nouvelles fibres. Elles sont notamment produites après une blessure, dans le système nerveux périphérique, mais aussi dans le cerveau et la moelle épinière. Au début des années 1980, la grande question était donc: «Pourquoi ces substances n'y exercent-elles pas leur effet?» se souvient Martin Schwab, professeur de neurosciences à

Des cellules gliales de souris, nommées «astrocytes» (à gauche), se transforment en neurones (à droite) après avoir été reprogrammées grâce à des virus génétiquement modifiés.

l'École polytechnique fédérale (EPF), à Lausanne, et à l'université de Zurich. Il menait alors des recherches à l'institut psychiatrique Max-Planck de Munich et a trouvé la réponse: il existe des molécules particulières dans le système nerveux central, appelées «protéines Nogo», qui annulent l'effet des facteurs neurotrophiques. À la fin des années 1980, Martin Schwab a identifié une telle «molécule d'arrêt»: la protéine Nogo-A, qui se fixe aux cellules nerveuses et les empêche de se développer davantage. Depuis, plusieurs autres mécanismes de ce type ont été découverts.

Si les cellules nerveuses peuvent donc théoriquement former de nouvelles fibres et connexions tout au long de leur vie, cette capacité est massivement limitée en pratique. Elle n'est utilisée que pour des changements structurels minimes, afin d'autoriser l'apprentissage ou la réparation de petites blessures. «C'est peut-être parce que, sinon, les choses deviendraient trop chaotiques», suppose Martin Schwab. Des expériences sur des animaux suggèrent en effet qu'une trop grande plasticité neuronale risque de devenir incontrôlable: lorsqu'on éteint les signaux d'arrêt en permanence, cela entraîne, entre autres, des problèmes d'apprentissage et des comportements évoquant ceux des patients schizophrènes.

Le neuroscientifique et ses collègues ont alors essayé de désactiver temporairement les mécanismes qui freinent la croissance des neurones. Avec succès: chez des rats paraplégiques,



l'administration d'anticorps contre la protéine Nogo-A a entraîné en quelques semaines la formation de nouvelles fibres nerveuses dans les zones lésées. Et les animaux ont partiellement retrouvé leur mobilité. «Les fibres et les connexions nouvellement formées créent des circuits fonctionnels, de sorte que le cerveau retrouve un certain contrôle sur la moelle épinière», explique Martin Schwab. Autre aspect rassurant, le processus de croissance déclenché de l'extérieur n'a pas causé un désordre néfaste dans le système nerveux central.

Pour Martin Schwab, les nouvelles voies nerveuses s'interconnectent au départ de manière relativement imprécise, puis les connexions inutiles régressent après la fin du traitement, tandis que celles qui sont nécessaires se renforcent. C'est d'ailleurs ce qui se produit lors du développement du système nerveux: les nourrissons et les jeunes enfants commencent par former un grand nombre de connexions et le système s'affine ensuite, ne laissant que celles qui sont utiles. Par conséquent, on estime que lors d'un traitement avec des anticorps contre la protéine Nogo-A consécutif à une blessure, les patients devront entraîner activement les fonctions qu'ils souhaitent récupérer.

DES ESSAIS CLINIQUES AVEC UN ANTICORPS CONTRE LA PROTÉINE NOGO-A

Les expériences sur les animaux étaient si prometteuses qu'une première étude clinique, menée de 2006 à 2012, a testé si un médicament à base d'anticorps contre la protéine Nogo-A était bien toléré. Les 52 participants, accidentés au cours des 4 à 28 derniers jours, avaient été si gravement blessés à la moelle épinière qu'ils étaient devenus paraplégiques ou tétraplégiques. Pendant un mois, on leur a injecté le médicament dans le liquide céphalorachidien, à l'extrémité inférieure de la moelle épinière. Résultat: tout le monde l'a bien toléré et, pour près de la moitié des patients, l'évolution de la blessure a été plus favorable que chez ceux qui n'avaient pas reçu le médicament (certains ont vu leurs symptômes moteurs s'améliorer).

Un nouvel essai clinique, qui a débuté à l'automne 2019 dans 14 centres à travers l'Europe, doit maintenant déterminer si le médicament améliore la mobilité des bras et des mains plus qu'un placebo. L'étude est ouverte aux tétraplégiques, dont les quatre membres sont paralysés. En outre, la lésion de la moelle épinière ne doit pas remonter à plus de quatre semaines. Les résultats des expérimentations animales indiquent en effet que les chances de succès sont meilleures dans la phase aiguë, probablement parce que le tissu n'est pas encore cicatrisé. Même s'il n'y a bien sûr aucune

garantie, tempère Martin Schwab: d'autres molécules pourraient se substituer à la protéine Nogo-A après sa neutralisation et entraver le mécanisme de croissance.

Frank Bradke, chercheur au Centre allemand pour les maladies neurodégénératives et professeur à l'université de Bonn, travaille donc sur une approche alternative. L'idée est basée sur ce qu'on appelle les «microtubules». Ces filaments protéiques, qui ressemblent à de longs tubes, procurent leur forme et leur sta-

Traités avec un anticorps contre la protéine Nogo-A, des rats paraplégiques ont partiellement retrouvé leur mobilité

bilité aux prolongements cellulaires. Certains médicaments anticancéreux les «gèlent», ce qui empêche les cellules tumorales de se multiplier. Mais l'équipe de Frank Bradke a découvert qu'à petite dose ces mêmes substances stimulent au contraire la croissance des microtubules. Des tests chez la souris ont alors révélé qu'elles permettaient aux prolongements nerveux endommagés de se régénérer.

Grâce à des méthodes spécifiques de microscopie, les chercheurs ont observé le développement des fibres neuronales: «Les cellules germent comme des plantes bien fertilisées», décrit Frank Bradke. En outre, ces substances sont capables de réduire la cicatrisation des tissus environnants, ce qui favorise la régénération des voies nerveuses abîmées – notamment car le tissu cicatriciel contient de nombreuses protéines Nogo.

Là encore, le neurobiologiste reste prudent: «Il est trop tôt pour parler d'applications thérapeutiques potentielles.» Frank Bradke se réjouit néanmoins que tant de voies soient explorées pour réparer le tissu nerveux. Et Magdalena Götz de souligner: «Nous avons besoin de ces nombreuses approches différentes, et chacune d'elles apprend et bénéficie de l'autre.» Peut-être parviendrons-nous un jour, grâce à ces recherches, à régénérer nos tissus cérébraux aussi facilement que le poisson-zèbre... ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Kjell et al., **Defining the adult neural stem cell niche proteome identifies key regulators of adult neurogenesis**, *Cell Stem Cell*, vol. 26(2), pp. 277-293e8, 2020.

S. Silvestro et al., **Stem cells therapy for spinal cord injury - An overview of clinical trials**, *International Journal of Molecular Science*, vol. 21(2), 659, 2020.

R. A. Barker et al., **New approaches for brain repair - from rescue to reprogramming**, *Nature*, vol. 557, pp. 329-334, 2018.

O. Lindvall, **Clinical translation of stem cell transplantation in Parkinson's disease**, *Journal of Internal Medicine*, vol. 279(1), pp. 30-40, 2015.

L'ESSENTIEL

➤ Le nombre de greffes de main pourrait augmenter tant les risques de rejet ont diminué. Ces opérations – une centaine à ce jour – restent controversées, car la vie du greffé n'est pas en jeu.

➤ À la suite de l'amputation d'une main, le cortex cérébral se réorganise, mais conserve, des dizaines d'années plus tard, une représentation de la main manquante.

➤ Les aires cérébrales précédemment dédiées à la main amputée sont capables de prendre en charge une nouvelle main, même après en avoir été privées durant des années.

➤ Les aires motrices et sensorielles se réarrangent à mesure que le greffé utilise de mieux en mieux sa main et retrouve ses sensations. D'autres zones du cerveau interviendraient dans cette réorganisation.

L'AUTEUR



SCOTT H. FREY
professeur de neurosciences
cognitives à l'université
du Missouri, à Columbia,
aux États-Unis

Ce que les greffes de main révèlent du cerveau

On commence à avoir assez de recul sur la greffe de main pour en déduire, par imagerie cérébrale, comment le cerveau se réorganise à mesure que la personne greffée apprend à se servir de sa nouvelle main.

Février 1964. Roberto Gilbert Elizalde, un chirurgien de Guayaquil, en Équateur, formé à la clinique Mayo, aux États-Unis, s'apprête à réaliser une opération chirurgicale inédite. Inspiré par la greffe réussie aux États-Unis d'un rein issu d'une personne décédée, il compte remplacer la main droite de Julio Luna, un marin de 28 ans, par celle d'un donneur. Le jeune homme a perdu sa main dans l'explosion d'une grenade.

Pendant neuf longues heures, Gilbert Elizalde et son équipe préparent minutieusement l'avant-bras de Julio Luna. Ensuite, ils connectent, avec une extrême précision, ses os, ses tendons, ses vaisseaux sanguins, ses muscles et sa peau avec ceux de la main d'un ouvrier, mort d'un ulcère à l'estomac. En

exploitant les techniques de microchirurgie les plus récentes, ils suturent la délicate gaine des fascicules, les groupes de fibres nerveuses qui constituent chaque nerf. Avec l'espoir que ces fascicules, semblables à des tubes, canaliseront les nerfs sensoriels et moteurs de l'avant-bras quand, au cours des mois suivants, ces derniers bourgeonneront et pousseront jusqu'à innervier à nouveau la main greffée.

Enfin, au moment où les pinces chirurgicales sont enlevées, Gilbert Elizalde et son équipe, épuisés, scrutent avec anxiété la main incolore qu'ils viennent de greffer. Et sont immensément soulagés de voir le sang de Julio Luna affluer et l'irriguer. Des messages de félicitations arrivent de toutes parts. La nouvelle fait la une du *New York Times*: «La main d'un homme mort greffée». Après le rein et la cornée, la main devient ainsi la troisième partie du

Donald Rickelman, greffé en 2011, utilise la main d'un autre pour tenir et toucher.



> corps humain à être transplantée. Toutefois, la réussite de la greffe n'est pas assurée. «De nombreux spécialistes s'accordent à dire que les chances de succès sont minimales», tempère le journal américain.

Lors de la première semaine, tout laisse penser que les sceptiques ont tort. Quand Julio Luna contracte les muscles de son avant-bras, les tendons de sa nouvelle main font déjà légèrement plier ses doigts. Les médecins administrent au jeune opéré un traitement immunosuppresseur, l'azathioprine, pour bloquer la réaction de son système immunitaire et empêcher le rejet de la main. Mais, au cours de la deuxième semaine, il devient évident que l'immunosuppresseur ne suffit pas. La gangrène apparaît et Julio Luna est transporté en avion à Boston, où, malgré d'ultimes tentatives pour sauver sa main, il doit être amputé, vingt-trois jours après la greffe.

La communauté médicale a tout à la fois salué et condamné Gilbert Elizalde pour cette opération à hauts risques. Ses détracteurs l'ont jugée contraire à l'éthique, dangereuse et inutile, car la vie de Julio Luna n'était pas en jeu. Il faudra trente ans pour qu'une greffe de main soit de nouveau tentée.

LES PREMIÈRES GREFFES DURABLES DE MAIN

Durant ces trente années, les techniques chirurgicales ont évolué et des immunosuppresseurs plus efficaces ont été mis au point (la ciclosporine, puis la rapamycine et le tacrolimus). De sorte que les greffes de certains organes – rein, foie, cœur – sont presque devenues des opérations de routine. Dans les années 1990, le succès de ces immunosuppresseurs a ouvert le champ des allogreffes, dans lesquelles le transplant est composé de différents tissus (muscle, peau, os, nerfs et vaisseaux). En septembre 1998, l'équipe de Jean-Michel Dubernard, à l'hôpital Édouard Herriot, à Lyon, a réalisé la deuxième greffe de main de l'histoire. Quelques mois plus tard, en janvier 1999, l'équipe de Warren Breidenbach a mené la troisième au Jewish Hospital de Louisville, dans le Kentucky. Le receveur, Matthew Scott, vient de fêter le 22^e anniversaire de cette transplantation réussie.

Depuis, une centaine d'opérations seulement ont été réalisées à travers le monde. La greffe de main reste une procédure expérimentale et controversée. D'une part, elle ne sauve pas de vies, contrairement à d'autres greffes. D'autre part, les receveurs subissent une opération chirurgicale lourde, suivie d'une longue convalescence et d'une rééducation intensive. De plus, ils doivent prendre un traitement immunosuppresseur à vie, qui a des effets secondaires et augmente les risques de cancer et d'infections. Douze ans après sa greffe, David

Savage, dont nous reparlerons, est mort d'un cancer qui pourrait être lié à son traitement immunosuppresseur.

Pourquoi ne pas se contenter d'une prothèse? De nombreux greffés de la main que nous avons interrogés ont exprimé leur insatisfaction: leurs prothèses les empêchaient de percevoir des sensations tactiles, comme la température d'une tasse de café. Et ils rêvaient, grâce à une greffe, de se sentir à nouveau «entiers». Neuf ans après son opération, l'un d'eux, Erik Hondusky, a développé un staphylocoque qui a conduit à l'amputation de la main greffée. Il utilise de nouveau une prothèse, à contrecœur, et uniquement lorsqu'il conduit sa moto.

De fait, en dépit d'avancées technologiques majeures, nombre d'amputés abandonnent les prothèses des membres supérieurs. En revanche, selon notre collaboratrice Christina Kaufman, de l'institut Christine M. Klienert pour la main et la microchirurgie, à Louisville, environ 80 % des receveurs conservent la main greffée pendant au moins cinq ans. Une proportion qui devrait augmenter, de même que le nombre de receveurs, les techniques s'améliorant pour rendre compatibles le donneur et le receveur. Aussi, il ne suffit plus que le greffon soit accepté pour qu'une greffe soit considérée comme réussie. De plus en plus, on évalue le succès d'une transplantation à l'utilisation fonctionnelle que le receveur fait de ses nouvelles mains. C'est là que la science du cerveau entre en jeu.

L'ILLUSION D'UN MEMBRE FANTÔME

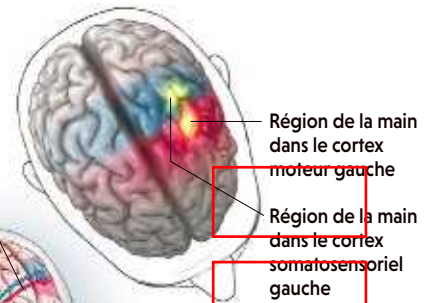
Depuis plus de vingt ans, mes collègues et moi-même cherchons à comprendre comment le cerveau planifie et contrôle les actions des mains. Nous explorons les mécanismes neuronaux du mouvement des mains à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), une technique qui permet d'avoir accès de façon non invasive aux fonctions cérébrales en suivant les fluctuations >

Environ 80% des receveurs conservent la main greffée pendant au moins cinq ans

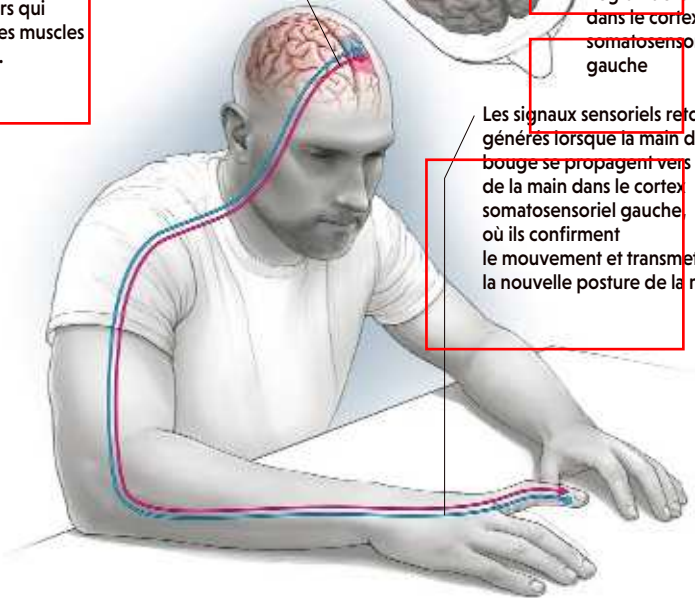
UN DÉLICAT RECÂBLAGE

A CHEMIN NEURONAL TYPIQUE

Pour bouger un doigt de la main droite, les neurones de la région du cortex moteur gauche correspondant à la main produisent des impulsions, lesquelles déclenchent les nerfs moteurs qui provoquent la contraction des muscles de l'avant-bras et de la main.



Les signaux sensoriels retours générés lorsque la main droite bouge se propagent vers l'aire de la main dans le cortex somatosensoriel gauche où ils confirment le mouvement et transmettent la nouvelle posture de la main.



Il arrive que des lésions des nerfs périphériques remodelent le système cérébral de commande de la main qui permet de prendre une fourchette sans hésitation. Lors d'une greffe de main, le chirurgien doit tenir compte du recâblage susceptible de se produire après une amputation quand il rétablit les connexions neuronales. Pour comprendre ce qui peut mal tourner, regardez ce qui se passe lorsqu'une personne ayant ses deux mains bouge un doigt de sa main droite **A**. Puis comparez ce fonctionnement typique avec trois exemples de ce qui peut se produire en l'absence d'une main **B**. Les recherches suggèrent que le cerveau d'au moins certains amputés conserve une représentation de la main même après sa disparition. Mais pour beaucoup, l'organisation du cortex cérébral est profondément altérée lorsqu'il est privé d'activité du fait d'une lésion des nerfs périphériques.

B CHEMIN NEURONAL CHEZ DES AMPUTÉS

SCÉNARIO 1

De nombreux amputés éprouvent des sensations de «membre fantôme». Si on leur demande de «bouger» le doigt qui n'est plus là ou si l'ancienne zone motrice de la main est stimulée par stimulation magnétique transcrânienne, ils ont l'impression de sentir des mouvements de doigts fantômes.

La région de la main dans le cortex moteur gauche s'active.

Dans certains cas, la région de la main dans le cortex somatosensoriel gauche présente aussi une activité accrue.



SCÉNARIO 2

Parfois, les signaux se brouillent. Chez certains amputés, la région du cortex correspondant à la main amputée s'active lorsqu'ils bougent les lèvres. L'activité augmente non seulement dans les aires sensorimotrices correspondant au visage, mais aussi dans d'autres qui contrôlaient le mouvement de la main avant l'amputation, du côté du cerveau opposé à la blessure.

Région de la main dans le cortex somatosensoriel gauche et dans le cortex moteur gauche

Régions de la bouche dans le cortex moteur

Régions de la bouche dans le cortex somatosensoriel

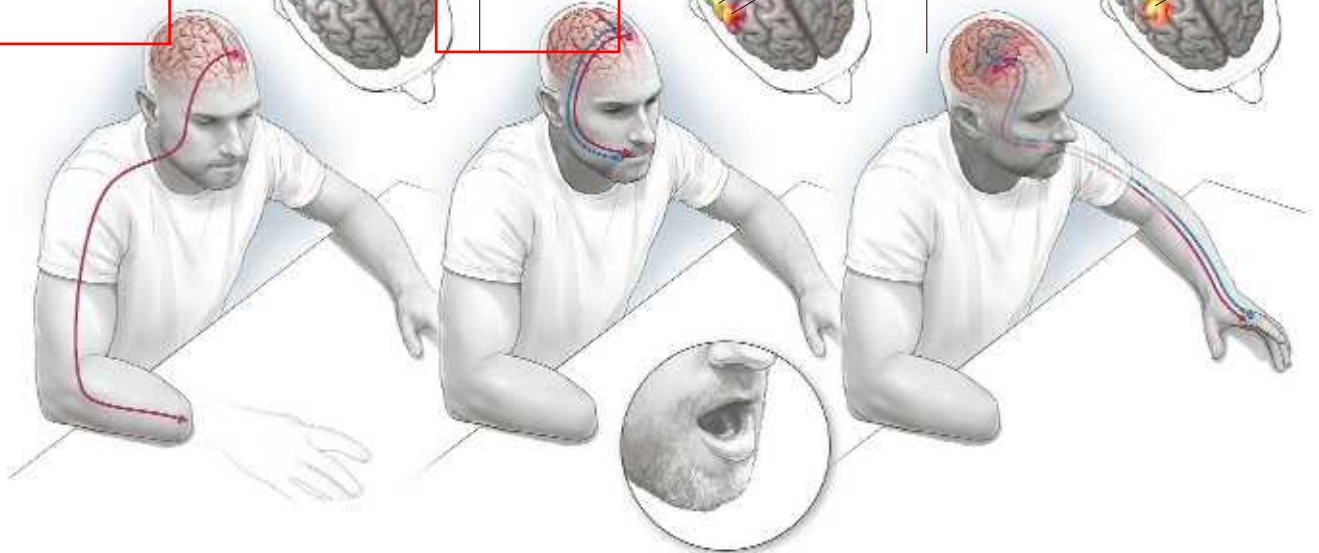
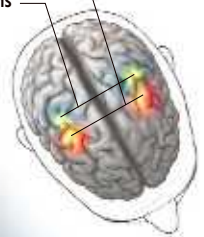


SCÉNARIO 3

Lorsque des personnes amputées d'une main effectuent des tâches qui impliquent leur main intacte, on observe une activité accrue dans les aires cérébrales correspondant à cette main, ainsi que dans celles précédemment consacrées à la main amputée, du côté du cerveau opposé à la blessure.

Régions des mains dans le cortex moteur

Régions des mains dans le cortex somatosensoriel





Quand des amputés remuent les lèvres, les aires cérébrales correspondant à la main disparue s'activent aussi

> locales de consommation d'oxygène des flux sanguins cérébraux, qui dépendent de l'activité neuronale.

Le principe de l'IRMf est le suivant. Imaginez que vous êtes volontaire pour une expérience classique d'IRMf durant laquelle vous devez taper du doigt par moments. Lorsque vous bougez un doigt de votre main droite, des neurones de la région dédiée au contrôle de la main dans votre cortex moteur gauche produisent des impulsions (chaque hémisphère du cerveau contrôle les mouvements et les sensations du côté opposé). Ces impulsions descendantes, nommées «potentiels d'action», traversent les structures sous-corticales et progressent le long de la moelle épinière avant d'atteindre les nerfs moteurs périphériques qui commandent la contraction des muscles adéquats de l'avant-bras et de la main. Le doigt bouge. Ses mouvements stimulent des récepteurs dans la peau, les tendons et les articulations, lesquels envoient alors des signaux de réponse (rétroaction) à la moelle épinière *via* des nerfs périphériques sensoriels. Des structures sous-corticales relayent ces impulsions ascendantes jusqu'à des neurones spécialisés dans la zone cérébrale dédiée à la main dans le cortex somatosensoriel gauche, qui traite les signaux sensoriels entrants.

Toute cette activité consomme de l'énergie. En une fraction de seconde, de minuscules capillaires se dilatent et saturent en sang riche en oxygène les zones cérébrales les plus actives. Cette augmentation de la concentration locale en hémoglobine oxygénée (oxyhémoglobine) diminue la concentration relative en hémoglobine désoxygénée (désoxyhémoglobine). Or quand l'hémoglobine est oxygénée, elle se trouve dans un état dit «diamagnétique» :

soumise au champ magnétique de l'IRM, elle devient très faiblement aimantée et crée un champ magnétique trop faible pour perturber celui de l'IRM. En revanche, la désoxyhémoglobine est dans un état fortement «paramagnétique» : soumise au champ magnétique de l'IRM, elle acquiert une aimantation suffisante pour perturber ce dernier. En d'autres termes, l'IRMf capte ces effets sous la forme d'un signal dépendant des variations en concentration relative entre oxy- et désoxyhémoglobine dans le sang, signal indirectement lié à l'activité neuronale. Ainsi, quand vous bougez un doigt de votre main droite, la région de la main dans votre cortex sensorimoteur gauche peut être visualisée par un code couleur sur l'écran d'un ordinateur.

De façon surprenante, il arrive que ces aires s'activent aussi chez des individus dont la main a été amputée. En effet, nombre d'entre eux ont l'impression que leur main est toujours présente : ils ont l'illusion d'avoir un «membre fantôme». Quand on leur demande de remuer leurs doigts fantômes, l'IRMf détecte une activité accrue dans les zones cérébrales dédiées à leur ancienne main, quand bien même elle a physiquement disparu depuis parfois plusieurs années. Ces résultats suggèrent qu'au moins chez certains individus le cerveau conserve une représentation de la main amputée. Cependant, tout n'est pas si simple.

D'après des décennies de recherches en neurosciences menées sur des animaux, nous savons que le cortex cérébral se réorganise lorsqu'il se trouve privé de l'activité habituelle d'un membre à cause d'une lésion des nerfs périphériques. En d'autres termes, les cartes des fonctions motrices et sensorielles dans le cortex dépendent de la stimulation. Il semble qu'il en aille de même, du moins en partie, chez les humains. Quand des amputés effectuent une tâche avec leur main valide, les aires sensorielles et motrices correspondant à cette main s'activent, comme attendu. Mais, plus surprenant, celles précédemment dédiées à leur main disparue s'activent également. Plus étonnant encore : quand on leur demande de remuer les lèvres, cela augmente aussi parfois l'activité de ces aires. Le cortex cérébral s'est donc réorganisé à la suite de l'amputation.

UNE RÉGÉNÉRATION ÉTONNAMMENT RAPIDE

C'est là que la greffe de main devient intéressante pour les neuroscientifiques. Un cerveau adulte conserve-t-il suffisamment de plasticité plusieurs années voire plusieurs dizaines d'années après l'amputation pour être capable de contrôler une main greffée ? Autrement dit, les aires cérébrales précédemment dédiées à la main amputée sont-elles capables de prendre en charge une nouvelle main ?

Grâce à sa main greffée, Donald Rickelman parvient à boutonner sa chemise sans effort.

> David Savage était l'individu idoine pour explorer les frontières de la récupération post-greffe. Nous l'avons rencontré début 2007, quatre mois après la greffe de sa main. Il l'avait perdue dans un accident survenu 35 ans auparavant. Pendant que nous parlions, il défit la bande Velcro de son attelle et libéra sa nouvelle main, qu'il se mit nonchalamment à ouvrir et fermer. Devant mon regard stupéfait, il esquissa un sourire, se saisit de mon stylo et écrivit son nom sur un bloc-notes. Voilà de quoi il était capable quatre mois après la greffe.

Contrairement aux neurones du cerveau ou de la moelle épinière, les nerfs périphériques repoussent après une lésion, et ce à une vitesse étonnamment élevée – jusqu'à 2 millimètres par jour. Pour favoriser cette régénération, le micro-chirurgien sépare soigneusement les fascicules nerveux les uns des autres. Ces fascicules englobent un grand nombre d'axones (les fibres nerveuses que projettent les corps cellulaires des neurones), un peu comme des gaines rassemblant plusieurs fils électriques en des faisceaux multicolores. Puis il suture chaque fascicule de l'avant-bras amputé au fascicule correspondant de la main du donneur. Une fois raccordés, les fascicules guident les axones moteurs de l'avant-bras qui repoussent vers les muscles de la main greffée, où ils forment une jonction neuromusculaire. De façon similaire, les axones qui transportent des signaux sensoriels vers le cerveau repoussent aussi vers la peau, les tendons et les articulations de la main greffée. Ils y produisent alors des récepteurs sensoriels, sensibles aux changements de pression, de vibration ou de température. On appelle «réinnervation» le processus par lequel les nerfs périphériques repoussent et rejoignent le réseau sensoriel.

CONTOURNER LES ERREURS DE RÉINNÉVATION

Mais même le chirurgien le plus talentueux ne peut contrôler la position exacte où les axones des nerfs périphériques termineront leur course dans la main greffée. Il en résulte des erreurs de réinnervation, qui deviennent autant de défis pour que le patient récupère l'usage de sa main. Dans l'avant-bras de David Savage, au cours de la régénération, certains axones avaient ainsi dévié et innervé des parties de peau à la base de son pouce, y formant de nombreux récepteurs sensoriels. Nous l'avons découvert, car David Savage, à un stade assez précoce de sa convalescence, était capable de détecter un contact léger dans cette zone de son pouce et de le localiser, tandis que le reste de sa main demeurait insensible. En d'autres termes, son cerveau traitait des informations non seulement transportées par des nerfs périphériques qui n'avaient pas servi depuis trente-cinq ans, mais aussi issues de récepteurs qui venaient d'apparaître dans une main autre que la sienne.

Bien des années après une greffe, les fonctions sensorielles et motrices des nouvelles mains progressent encore

Les erreurs de réinnervation auraient pu constituer un problème pour David Savage. Un nerf sensoriel qui recevait autrefois les signaux issus, par exemple, de la base de son pouce de naissance transmettait à présent des signaux issus d'un autre endroit de sa paume transplantée. Mais son cerveau a trouvé comment les compenser. En peu de temps, il a appris à interpréter les nouveaux signaux qu'il recevait. Quand nous sondions sa paume, David Savage localisait correctement l'origine de ses sensations sur la paume, non sur les doigts. Elles étaient décalées de quelques millimètres seulement. Restait à comprendre comment le cerveau avait remis en place les pièces du puzzle. Notre hypothèse est la suivante : à force de coupler des signaux visuels et tactiles – voir et toucher en même temps avec la nouvelle main –, le cerveau apprend à corriger les erreurs de réinnervation.

Durant les examens d'IRMf, lorsque nous avons stimulé la paume de la main transplantée avec une petite brosse, la zone adéquate du cortex sensoriel de David Savage a aussitôt été activée. Mais cela ne signifiait pas pour autant que tout était redevenu normal. Comme avec d'autres amputés, quand nous avons stimulé la paume de sa main gauche intacte, cette même zone s'est aussi activée en plus du cortex sensoriel droit, signe que l'inhibition entre les deux hémisphères était moins forte qu'en temps normal. Peut-être ce défaut d'inhibition a-t-il contribué à maintenir les représentations cérébrales de la main manquante durant la période d'amputation? Quoi qu'il en soit, David Savage a toujours su dire si nous stimulions sa main intacte ou sa main greffée.

Il a finalement succombé à un cancer, mais il arrive qu'une main greffée soit fonctionnelle durant des dizaines d'années. Matthew Scott, le premier patient greffé de main à Louisville, en 1999, vit avec une main greffée depuis plus longtemps que quiconque (vingt et un ans). Il a été opéré treize ans après avoir perdu sa main

gauche dans un accident de feux d'artifice qui s'est produit lorsqu'il était âgé d'une vingtaine d'années. Nous l'avons rencontré en 2008. Depuis longtemps, il percevait des sensations dans sa nouvelle main, ce qui indiquait que les nerfs sensoriels avaient achevé leur croissance. Il était capable de localiser un contact n'importe où sur sa main greffée, avec une précision inférieure de quelques millimètres seulement à celle de sa main intacte. Grâce aux examens d'IRMf, nous avons montré que chacun de ses doigts activait des zones distinctes dans l'aire du cortex sensoriel correspondant à la main.

Nous ne pouvons pas en conclure que l'organisation de son cortex sensoriel est identique à celle qu'il avait avant de perdre sa main. Nous ne disposons d'aucune information sur son cerveau d'alors et, même si tous les cerveaux présentent *grosso modo* la même organisation, il existe de légères différences. Certaines sont d'origine génétique. D'autres sont acquises au cours de la vie. Ce que nous pouvons affirmer, c'est que le cortex sensoriel de Matthew Scott est dans la norme, similaire à celui d'individus dotés de leurs deux mains. Néanmoins, neuf ans après la greffe, des traces de l'amputation persistaient dans son cerveau : chez lui aussi, la stimulation de la main droite intacte augmentait l'activité de la zone cérébrale de son ancienne main. Comment, alors, sa main greffée fonctionnait-elle aussi bien ? Nous supposons que d'autres régions du cerveau, situées en amont des zones de la main et non impliquées directement dans les fonctions sensorielles et motrices, contribuent à cette efficacité.

DES AIRES CORTICALES PLUS EN AMONT IMPLIQUÉES ?

Au laboratoire, grâce à des tâches simples (bouger un doigt, effleurer une main...), nous explorons l'organisation des cortex moteurs et sensoriels. Mais, dans la vie réelle, nous devons saisir et manipuler des objets. Ce sont des actions bien plus complexes et entreprises dans un but précis. Elles impliquent des zones du cerveau dotées d'un niveau supérieur d'intégration d'informations, comme les aires pariétales et prémotrices. Ces aires utilisent des informations multisensorielles sur les propriétés de l'objet et le positionnement du corps humain pour planifier des mouvements visant un objectif spécifique, comme saisir une tasse et y boire.

Les expériences que Ken Valyear, de l'université de Bangor, dans le Pays de Galles, a menées à partir de 2014 dans notre laboratoire appuient cette hypothèse. À l'aide de techniques de capture de mouvement et d'IRMf, il a étudié comment un autre greffé, Donald Rickelman, parvenait à se saisir d'objets placés dans son champ de vision. Cet homme avait bénéficié d'une greffe en 2011, quatorze ans après avoir perdu sa main gauche dans un

accident. Nous nous sommes particulièrement intéressés au rôle du cortex intrapariétal antérieur, une petite région située juste derrière l'aire sensorielle de la main et impliquée dans la forme que la main adopte pour saisir un objet, en fonction de ce que le cerveau perçoit de cet objet (taille, forme, orientation...).

Comme les autres receveurs que nous avons étudiés, Donald Rickelman, vingt-six et quarante et un mois après la greffe, présentait des signes de réorganisation dans les zones corticales motrices et sensorielles de sa main. Sans surprise, il a lui aussi rencontré des obstacles pour recouvrer certains usages de sa main. En analysant ses mouvements tandis qu'il essayait de saisir un objet, nous avons étudié ses progrès au cours de cette période. Comment compensait-il ses déficiences motrices et sensorielles ? Pour le découvrir, nous avons construit un dispositif spécial qui, couplé à l'IRMf, nous permettait de répondre spécifiquement à cette question. Résultat : quand, vingt-six mois après son opération, Donald Rickelman attrapait des objets, l'activité de son cortex intrapariétal antérieur et de son cortex prémoteur était inférieure à celle de personnes dont les bras étaient intacts. En revanche, quarante et un mois après l'opération, elle avait augmenté, s'approchant de celle des sujets témoins. Cette amélioration de sa capacité à prendre des objets avec sa main transplantée pourrait être liée à ces régions cérébrales de niveau supérieur, qui compenseraient les performances amoindries des zones motrices et sensorielles réorganisées.

Aujourd'hui, de nombreuses années après la greffe, les fonctions sensorielles et motrices des nouvelles mains de Donald Rickelman et Matthew Scott continuent de progresser. Cela suggère que les modifications cérébrales liées à l'apprentissage perdurent et contribuent à la récupération fonctionnelle longtemps après que les nerfs périphériques ont été entièrement reconstitués. Nous cherchons désormais à établir le lien entre de tels réarrangements cérébraux et l'activité des mains dans la vie de tous les jours, que nous mesurons à l'aide de capteurs sans fil.

Si le superpouvoir de nerfs périphériques est leur capacité à se régénérer en cas de lésion, celui du cerveau est son aptitude à se reconfigurer en réponse aux sollicitations. Les deux tiennent des rôles complémentaires dans la récupération après une blessure. Bien que les recherches avec les personnes ayant bénéficié d'une greffe de main n'en soient qu'à leurs débuts, elles ont déjà montré que le cerveau humain est capable de répondre à une stimulation après en avoir été privé durant des années. Elles interrogent aussi les limites de la neuroplasticité chez l'adulte, apportant de l'espoir à ceux qui luttent pour surmonter les effets de l'amputation et d'autres blessures. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. F. Valyear et al., **Grasping with a new hand: Improved performance and normalized grasp-selective brain responses despite persistent functional changes in primary motor cortex and low-level sensory and motor impairments**, *Neuroimage*, vol. 190, pp. 275-288, 2019.

S. Kikkert et al., **Revealing the neural fingerprints of a missing hand**, *eLife*, vol. 5, article e15292, 2016.

B. A. Philip et S. H. Frey, **Compensatory changes accompanying chronic forced use of the nondominant hand by unilateral amputees**, *J. Neurosci.*, vol. 34(10), pp. 3622-3631, 2014.

S. H. Frey et al., **Chronically deafferented sensory cortex recovers a grossly typical organization after allogenic hand transplantation**, *Current Biology*, vol. 18, pp. 1530-1534, 2008.

ALESSANDRO FARNÈ

est directeur de recherche de l'Inserm au sein du centre de recherches en neurosciences de Lyon, où il codirige avec Denis Pélisson l'équipe Intégration multisensorielle perception action et cognition (Impact). Il est aussi coresponsable avec Romeo Saleme de la plateforme de neuro-immersion du centre.



Au lieu de plasticité cérébrale, il faudrait parler d'équilibre dynamique

Depuis quelques années, il paraît de plus en plus clair, grâce aux études sur des sujets amputés et sur les greffes de main, que les régions cérébrales du contrôle moteur et de la perception tactile tendent en permanence à maintenir un équilibre qui préserverait les fonctions des membres. Le point avec Alessandro Farnè, chercheur en neurosciences cognitives.

Cela fait plus de vingt ans que l'on sait greffer des mains et que les receveurs apprennent

à s'en servir. Qu'est-ce que cela a changé dans notre compréhension de la plasticité cérébrale ?

On peut identifier trois phases différentes. Pendant longtemps, avant la greffe de main, les connaissances sur la plasticité cérébrale venaient de l'amputation. On pensait qu'à la suite d'une amputation de la main, une réorganisation s'opérait dans le cortex somatosensoriel (une région cérébrale qui reçoit les informations provenant de la surface du corps) et dans le cortex moteur (la région cérébrale qui contrôle les mouvements). De nombreuses études chez l'animal avaient renforcé cette idée qu'une forme de plasticité était possible, où différentes zones adjacentes pouvaient envahir le territoire laissé libre par la main amputée.

Quand a débuté cette première phase ?

Sans doute dans les années 1980, avec les travaux de Michael Merzenich, à l'université de Californie à San Francisco, et ses collègues sur des singes dont ils perturbaient l'innervation de la main, et avec ceux du neurophysiologiste américain Tim Pons, tant chez l'humain que chez l'animal. Ces différents travaux suggéraient qu'à la suite de l'amputation de la main, l'aire corticale sensorimotrice de la main devenait silencieuse, puis, peu après, redevenait activable, c'est-à-dire répondait à d'autres parties du corps, comme le toucher de parties du visage.

À partir des années 1990, les recherches du neuroscientifique indo-américain Vilayanur Ramachandran sur les sensations «référées» sont venues appuyer un rôle fonctionnel à cette plasticité. Son équipe a observé que si, chez des amputés, on touchait des zones particulières des moignons ou du visage, certaines personnes percevaient des sensations tactiles non seulement sur les zones touchées, mais aussi sur le membre fantôme, sensations qualifiées de «référées», car elles surviennent sur une autre partie du corps que celle qui a été stimulée.

L'explication avancée était la suivante: le visage envahissait la représentation de la main. En d'autres termes, le territoire cortical qui, auparavant, était entièrement dédié à la représentation de la main, ne l'était plus. Ces travaux suggéraient une capacité insoupçonnée de réorganisation à large échelle du cerveau humain, au-delà de la dizaine de millimètres. Ils ont donné lieu à une vision d'un cerveau extrêmement plastique. Ils ont aussi ouvert la voie à une meilleure compréhension de la douleur du membre fantôme, avec l'aide, notamment, des travaux de la neuropsychologue Herta Flor, en Allemagne. À partir du milieu des années 1990, cette dernière a en effet montré qu'il existe une corrélation entre la gravité

de la douleur du membre fantôme et le degré de réorganisation du cortex somatosensoriel et du cortex moteur. Par exemple, plus la représentation de la bouche (la zone cérébrale qui s'active lorsque l'on touche la bouche) empiète sur celle de la main amputée, plus la douleur est importante.

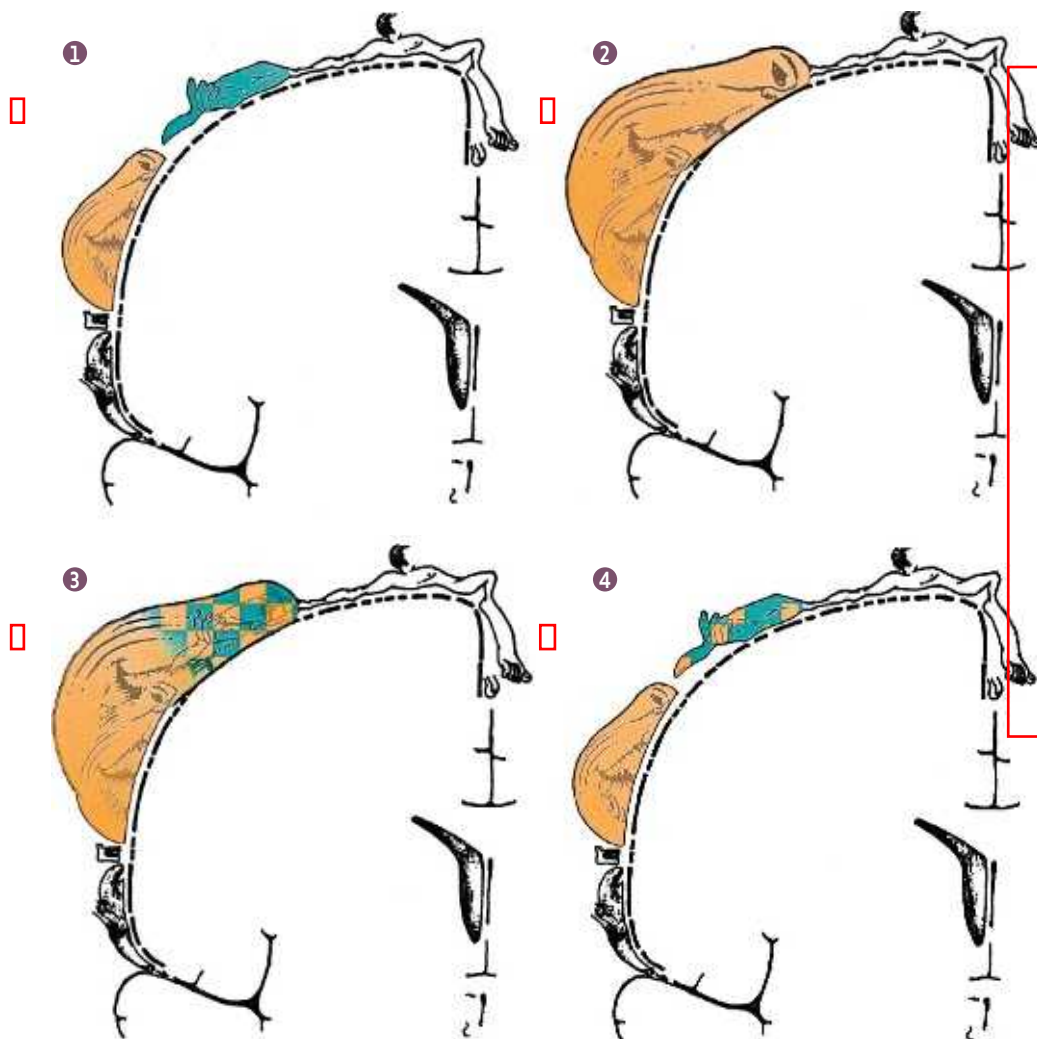
Qu'a changé la greffe de main dans cette vision de la plasticité cérébrale ?

Avant même la greffe de main, certains chercheurs s'interrogeaient: avec une telle plasticité cérébrale, la représentation de la main amputée finit-elle par disparaître? C'est à ce moment-là que les premières greffes durables de main ont eu lieu, à partir de 1998. On s'est aperçu que la perte de la main ne signifiait pas une disparition de sa représentation corticale. Cela a été le tournant.

En France, c'est Angela Sirigu, de l'Institut des sciences cognitives, à Bron, qui a mené ces travaux. Quelques mois après la première double greffe de mains en France, réalisée en 2000 par Jean-Michel Dubernard à l'hôpital Édouard-Herriot, à Lyon, nous avons eu la possibilité de suivre ensemble le patient greffé, Denis Chatelier, un homme de 33 ans qui avait perdu ses mains quatre ans plus tôt lors d'une explosion accidentelle de feux d'artifice. Nous avons montré qu'à la suite de la greffe, la sensation tactile est revenue assez vite – elle était déjà très bonne au bout de cinq mois. Cependant, le patient ne percevait plus la stimulation tactile de sa main droite quand on stimulait simultanément la partie droite de son visage: une seule perception était possible, celle du visage. À l'époque, nous avons interprété cela comme une conséquence de l'invasion de la représentation du visage dans l'aire corticale de la représentation de la main, mais au bout de quelques mois de suivi, nous nous sommes aperçus que Denis Chatelier était de nouveau capable de percevoir simultanément les deux stimulations (voir la figure page 42).

Cela remettait en question votre première interprétation...

Oui. Peut-être restait-il, après tout, des vestiges de représentation de la main dans cette région du cortex. C'est aussi à cette époque que plusieurs études par imagerie cérébrale de personnes amputées ont suggéré qu'une représentation du membre fantôme persistait dans le cerveau, dans une zone distincte de celle du moignon. Ce qu'a confirmé l'équipe d'Angela Sirigu en 2006 en stimulant par des techniques transcrâniennes, chez des amputés de la main, la zone qui était auparavant celle de la représentation de la main: cette stimulation a déclenché des mouvements du membre fantôme, dont certains que les patients n'arrivaient plus à produire volontairement. Tous ces travaux et >



L'amputation et la greffe de main produisent des changements dans le cortex somatosensoriel, ici schématisés en 2002 à l'aide de l'homunculus somatosensoriel, une carte qui associe aires cérébrales et fonctions sensorielles. Chez une personne non amputée, les aires du visage (en orange) et de la main (en vert) sont séparées (1). Lorsque la main est amputée, l'aire de la main se met à répondre aux stimulations du visage, ce qui donne l'impression que l'aire du visage envahit celle de la main (2). Après une greffe de la main, la main commence à regagner le territoire perdu et les deux aires se chevauchent (3). Peu à peu, la représentation de la main se rétablit, séparée de celle du visage (4). Aujourd'hui, les neuroscientifiques pensent que même chez les personnes non amputées, les aires somatosensorielles associées aux différentes parties du corps ne sont pas aussi séparées que suggéré auparavant.

> d'autres, comme ceux de Scott Frey sur les greffes aux États-Unis (voir l'article page 32), ont ouvert la possibilité de se dire que même s'il y a de la plasticité, il y a aussi un maintien. Tout ne change pas au niveau cortical.

Cela a eu des conséquences importantes sur l'approche à adopter pour redonner une fonctionnalité à la main greffée: si la représentation corticale a disparu, il faut faire un long chemin pour espérer qu'une plasticité se réinstalle dans le cerveau et crée une nouvelle fonctionnalité *ex nihilo*. Si la représentation de la main existe encore dans le cortex, peut-être n'est-il pas nécessaire de faire tout le chemin en partant de zéro pour qu'elle redevienne fonctionnelle. L'approche relève plutôt d'une réadaptation.

Comment peut-il y avoir à la fois maintien et plasticité?

C'est toute la question, et c'est elle qui a conduit récemment certains chercheurs à s'interroger sur la signification des résultats obtenus. C'est l'équipe de Tamar Makin, à l'institut de neurosciences cognitives de l'University

College de Londres, qui, en 2016, a révélé comment, finalement, la représentation cérébrale de la main des amputés est préservée. En utilisant l'imagerie fonctionnelle à haut champ, Tamar Makin a observé que la représentation des doigts de la main manquante persiste dans le cortex somatosensoriel primaire même des décennies après l'amputation. Comment, alors, concilier une grande capacité cérébrale de plasticité et une grande capacité à préserver le *statu quo*? Comment redéfinir le phénomène de plasticité? D'où l'idée de troisième phase.

Des réponses se dessinent?

Oui, notamment grâce à des études sur des personnes non amputées. Jusqu'à récemment, le modèle dominant pour étudier la réorganisation corticale était celui de l'amputation. Mais depuis quelques années, des approches plus fines permettent de mener des études auprès de sujets normaux. Par définition, ces personnes n'ont pas subi de changement cortical particulier, ce ne sont pas des cas spéciaux. Or on s'aperçoit que selon l'approche méthodologique que l'on

utilise, des remaniements de l'activité cérébrale peuvent être interprétés comme une réorganisation corticale ou un maintien.

Dans un article soumis pour publication, par exemple, les chercheurs de la même équipe ont anesthésié temporairement un doigt de la main et ont regardé comment, dans les quelques minutes qui ont suivi l'anesthésie, l'organisation corticale a évolué. Ils ont bien retrouvé une réorganisation locale du cortex somatosensoriel, comme attendu. Mais ils ont aussi montré, par une autre approche, que cette anesthésie locale diminuait la représentation corticale de tous les doigts de la main et non du seul doigt anesthésié. De plus, la représentation du doigt anesthésié persistait et était distincte de celle des autres doigts... En d'autres termes, par une approche, ils observaient une réorganisation, et par une autre, une organisation maintenue, même si plus ténue.

En quoi les deux approches différaient ?

Dans les études de neuro-imagerie fonctionnelle, le principe est souvent le même : on produit une activité sensorielle ou motrice – par exemple on touche ou on bouge un

Qu'en déduire concernant la plasticité cérébrale ?

Tamar Makin et Dollyane Muret, une chercheuse française en postdoctorat dans son laboratoire, viennent de publier un article très éclairant où elles font le point sur la situation. En substance, l'« homunculus », une carte associant des aires cérébrales à des fonctions motrices ou sensorielles et qui a été l'icône des neurosciences de ce siècle, ne représente pas simplement une façon de visualiser comment les entrées (stimulations) et les sorties motrices (actions) sont représentées dans le cerveau, mais plutôt des aspects fonctionnels. Par exemple, l'aire dite « de la main » répond à d'autres parties du corps qui peuvent aussi être des effecteurs de la saisie, mais non dominants, comme les pieds. Il arrive d'ailleurs que ces derniers deviennent des effecteurs dominants dans des cas très spécifiques où les patients n'ont jamais eu de mains et ont développé une capacité extrêmement fine de contrôle moteur du pied qui ressemble à celle de la main, tant dans la fonction que dans l'organisation de la représentation corticale. Certaines de ces personnes sont devenues des artistes qui peignent avec leurs pieds.

Pour Dollyane Muret et Tamar Makin, de plus en plus de travaux comme ceux-là suggèrent qu'au lieu de plasticité, il faudrait plutôt parler d'équilibre dynamique. La plasticité ne serait pas tant le remplacement d'une représentation d'une partie du corps disparue par une autre qu'une sorte de mécanisme stabilisant les fonctions de la partie disparue en représentant, dans l'aire corticale dédiée à cette partie, toutes les autres parties du corps qui peuvent effectuer ces fonctions. Cet équilibre dynamique permettrait à la fois de maintenir la forme de l'homunculus en stabilisant certaines fonctions et autoriserait une activité corticale latente beaucoup plus distribuée qu'on ne le pensait, avec des représentations motrices et somatosensorielles bien plus entremêlées.

Cette nouvelle vision ouvre-t-elle des horizons pour améliorer la vie des amputés ?

Elle pourrait aider à améliorer les prothèses. Du fait des traitements et des risques qui accompagnent l'allogreffe (la greffe d'un membre provenant d'une autre personne), celle-ci n'est pas indiquée pour tous les patients. L'autre solution est alors une prothèse, qu'elle soit « myoélectrique », c'est-à-dire contrôlée, au moyen d'électrodes, par les signaux électriques que génère la contraction musculaire, ou « sensible », munie d'un retour tactile. Toutefois, on s'aperçoit de plus en plus qu'obtenir un bon retour tactile est difficile, tout en étant essentiel pour avoir un bon >

L'aire dite « de la main » répond à d'autres parties du corps qui peuvent aussi être des effecteurs de la saisie, comme les pieds

doigt – et on regarde la région où cette activité produit une activité cérébrale. Mais si l'on attribue de façon sélective le maximum d'activité à un seul doigt (par exemple, celui qui a bougé), on risque de sous-estimer l'activité de cette même région évoquée par le mouvement d'autres doigts adjacents. A *contrario*, des méthodes dites « multivariées » permettent de vérifier si chaque doigt contribue à la représentation corticale des autres. Ainsi, selon la méthode d'analyse, on peut obtenir des résultats opposés, mais complémentaires, comme l'équipe de Tamar Makin l'a mis en évidence dans l'étude sur le doigt anesthésié.

> contrôle moteur et une fonctionnalité de la main véritablement utile. Toutes les études rétrospectives des taux de succès d'utilisation fonctionnelle des prothèses auprès des amputés sont très décevantes. Les prothèses sont très peu utilisées, car elles demandent beaucoup d'efforts d'adaptation.

La découverte qu'une représentation de la main amputée persiste dans le cerveau est très importante pour les chercheurs travaillant dans ce domaine, comme Sliman Bensmaia, à l'université de Chicago, et ses collègues. Cette équipe s'attache à décrypter les codages de la perception du toucher au niveau du cortex somatosensoriel afin d'implémenter des solutions viables pour les prothèses sensibles. La nouvelle vision suggère que la prothèse doit s'insérer dans une sorte de moule naturel pré-conçu. Cela signifie que si l'on arrive à mimer suffisamment bien la fonctionnalité entre la main bionique que l'on conçoit et la représentation de la main dans le cerveau, on augmente les chances d'obtenir un meilleur contrôle de la prothèse.

C'est aussi ce que suggère une étude que l'équipe de Sliman Bensmaia a publiée en décembre dernier, où elle montre que, contrairement à ce que Scott Frey a observé avec les mains greffées (voir l'article page 32), lorsque le câblage d'une prothèse sensible comporte des erreurs, des années de stimulations simultanées visuelles et tactiles ne suffisent pas à relocaliser correctement les perceptions tactiles: par exemple, le toucher vu sur un doigt mais perçu sur la paume reste invariablement perçu sur la paume. En d'autres termes, il faut bien connaître les règles pour pouvoir y adhérer et avoir un maximum de chance qu'une prothèse soit fonctionnelle pour la personne qui l'utilise.

Et concrètement, commence-t-on à comprendre en quoi ces règles consistent ?

Oui, des pistes se dessinent. Toujours en décembre dernier, Tamar Makin, la philosophe française Frédérique de Vignemont et le professeur de neuro-ingénierie italien Silvestro Micera ont proposé des indications pour la conception de prothèses: il vaut mieux imaginer une prothèse qui permet une fonction, comme la saisie, quitte à ce qu'elle ne ressemble pas à une main, plutôt que d'essayer de reproduire une main et risquer que le cerveau ne l'incorpore pas dans son fonctionnement.

Finalement, les prothèses et les greffes de main nous apprennent-elles des choses différentes sur le fonctionnement cérébral ?

Je n'ai pas de réponse, mais la notion d'incorporation est peut-être une clé pour comprendre les spécificités de chaque approche. Avec Frédérique de Vignemont, nous étudions

comment notre perception se modifie avec l'utilisation d'outils. Vous connaissez peut-être l'illusion de la main en caoutchouc: on dissimule une main d'un sujet et on place devant lui une main en caoutchouc, puis on stimule de la même façon la main cachée et celle en caoutchouc. Après quelques minutes de stimulation, le sujet a l'impression que la main en caoutchouc devient la sienne. Dans cette illusion, la conjugaison de trois informations sensorielles – la vue, le toucher et la proprioception – pousse le cerveau à incorporer la main en caoutchouc, à la considérer comme étant une partie du corps. Mais un outil fournira-t-il le même résultat ? Nous avons montré que l'incorporation de la main en caoutchouc diffère de celle des outils.

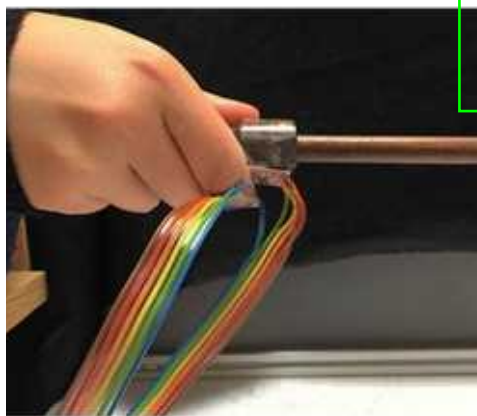
Comment avez-vous procédé ?

Il y a quelques années, au laboratoire, Alice Roy et moi avons fait l'hypothèse que si notre capacité à contrôler aussi bien les outils vient du fait qu'on les intègre dans notre contrôle moteur, alors cela signifie qu'on les intègre dans la représentation de notre corps, et plus spécifiquement dans la représentation du membre qui les utilise. Par conséquent, le fait d'utiliser un nouvel outil devrait changer quelque chose dans le contrôle moteur de ce membre. Pour tester cette hypothèse, nous avons étudié la cinématique du mouvement de saisie d'un verre avant et après l'utilisation d'une pince qui allonge le bras de 40 centimètres. Les sujets, qui ne connaissaient pas l'outil, l'ont contrôlé

Ce n'est pas parce que l'on a incorporé un outil qu'on le perçoit comme une partie du corps

presque immédiatement. Surtout, la cinématique du mouvement a changé: après l'utilisation de la pince, leur bras bougeait comme s'il était devenu plus long. Une sorte de plasticité fonctionnelle semblait s'être mise en place de façon temporaire.

Avec Luke Miller, alors en postdoctorat au laboratoire, nous avons aussi regardé le côté perceptif: depuis Descartes, on sait que les



Pour étudier la perception que l'on a par un outil, l'équipe d'Alessandro Farnè a testé la capacité d'individus à détecter la localisation d'impacts le long d'un bâton qu'ils tenaient en main sans le voir (à gauche, le dispositif expérimental), que le bâton soit rigide ou semi-rigide (à droite en haut). Elle a aussi évalué la propagation de vibrations induites par ces impacts à l'aide d'un accéléromètre fixé à un doigt (à droite en bas).

humains sont capables de localiser les choses dans l'espace par le bout d'un outil, par exemple une canne. Mais pourquoi ne ressentirait-on que le bout? Si la canne est comme un bras, on devrait ressentir si on est touché tout le long de la canne et où. Nous avons donc généré des impacts à différents endroits d'un bâton d'un mètre tenu par des sujets sans qu'ils puissent le voir: ils ont tous été capables de localiser à quel endroit le bâton avait été touché, quasiment comme si c'était leur bras (voir la figure page 45).

Ensuite, nous avons essayé de voir quel processus cérébral était impliqué dans ce phénomène. Nous avons montré que les mécanismes de perception tactile derrière cette capacité de localisation du toucher sur le bâton semblent être les mêmes que ceux derrière la localisation sur notre propre corps – un résultat de plus en faveur de l'idée que l'important, c'est la fonction.

En quoi l'incorporation des outils diffère-t-elle de celle de la main en caoutchouc?

Sans entrer dans les détails, nous avons accumulé plusieurs preuves aux niveaux moteur et sensoriel suggérant que ce n'est pas parce que l'on a incorporé un outil qu'on le perçoit comme une partie du corps. Ce que l'on veut avec un outil, c'est pouvoir l'utiliser sans crainte, dans des situations où la main n'aurait pas assez de force ou ne serait pas adaptée, par exemple. Il y aurait donc différents niveaux d'incorporation. Un niveau relèverait plus des parties corporelles, comme la main en caoutchouc, et d'autres d'outils plus fonctionnels.

Où situer les prothèses dans ce cas?

C'est toute la question. La réponse varie peut-être en fonction de la typologie de la prothèse: si elle ressemble visuellement à la main, on se rapprochera de la main en caoutchouc. Si la prothèse met en avant plutôt la fonction et si, visuellement, on n'a pas vraiment la sensation que c'est une partie du corps, on se rapprochera plus de l'incorporation d'un outil. Mais le sujet est encore très débattu et les recherches se poursuivent.

De votre côté, comment les poursuivez-vous?

Nous continuons les expériences sur l'incorporation d'outils en étudiant la façon dont le contrôle moteur et la perception de l'espace bénéficient du fait que l'individu a accès à différentes informations sensorielles. Nous démarrons aussi un projet pour voir comment les personnes aveugles pourraient bénéficier des capacités de localisation tactile sur un bâton que nous avons mises en évidence. Par ailleurs, j'ai la chance d'être responsable d'une plateforme de neuro-immersion qui accueille des recherches cognitives de toute la France. Cette plateforme permet d'utiliser la réalité virtuelle pour répondre à des questions difficiles à aborder en laboratoire. Des études sur la plasticité cérébrale devraient y commencer bientôt. Nous avons par exemple prévu de donner aux participants une vision altérée de l'outil utilisé, afin de déterminer comment la vision, qui domine nos autres sens, influence nos capacités de contrôle moteur et de localisation du toucher. ■

Propos recueillis
par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

D. Muret et T. Makin, **The homeostatic homunculus: Rethinking deprivation-triggered reorganisation**, *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 67, pp. 115-122, 2021.

D. B. Wesselink et al., **Malleability of the cortical hand map following a finger nerve block**, *Biorxiv*, 2020.

M. Ortiz-Catalan et al., **Chronic use of a sensitized bionic hand does not remap the sense of touch**, *Cell Reports*, vol. 33, article 108539, 2020.

A. Farnè et al., **Face or hand, not both: Perceptual correlates of reafferentation in a former amputee**, *Current Biology*, vol. 12, pp. 1342-1346, 2002.



L'ESSENTIEL

> Il y a environ 200 000 ans, les Néandertaliens savaient produire le brai de bouleau, une matière plastique et collante.

> Les préhistoriens pensaient que la production de cette poix exigeait un procédé complexe, et donc que les Néandertaliens

avaient un haut niveau cognitif et de fortes capacités de planification.

> L'archéologie expérimentale montre cependant que l'on peut aussi produire du brai de bouleau par des procédés simples, susceptibles d'avoir été découverts par hasard.

L'AUTEUR



PATRICK SCHMIDT
préhistorien et enseignant-chercheur à l'université de Tübingen, en Allemagne

Comment les Néandertaliens fabriquaient-ils du goudron?

À partir d'écorce de bouleau, les Néandertaliens produisaient du goudron collant. Invention géniale ou fortuite? L'archéologie expérimentale fait pencher la balance vers la deuxième hypothèse.

En 1856, quand on a découvert des restes fossiles d'un Néandertalien, les savants européens étaient persuadés qu'ils tenaient enfin le « chaînon manquant » séparant les singes des humains. Le robuste squelette ne pouvait en effet appartenir qu'à une forme primitive ayant précédé l'homme moderne. Au milieu du XIX^e siècle, cette façon de raisonner n'avait rien d'absurde. Après tout, pensait-on, l'homme anatomiquement moderne, *Homo sapiens*, avait remplacé l'homme de Néandertal, voire l'avait exterminé. Il n'avait pu en effet que lui être supérieur grâce à sa plus grande intelligence et à ses capacités d'adaptation. Une explication qui semblait très naturelle aux mentalités du XIX^e siècle.

Depuis, beaucoup de choses ont changé. Dans les décennies qui ont suivi la découverte, les préhistoriens ont pu montrer que les Néandertaliens (*Homo neanderthalensis*) ont colonisé très tôt l'Europe et certaines parties du

Proche-Orient. Ils se sont rendu compte que ces humains ont résisté pendant près de 250 000 ans aux dures conditions de vie des périodes glaciaires. Aujourd'hui, on sait aussi qu'ils produisaient des armes de chasse et des outils par une technique suggérant une grande capacité de planification: la méthode Levallois. Elle consiste à mettre d'abord en forme un bloc de pierre – un nucléus – afin de faciliter l'obtention de gros éclats en une seule percussion. *Homo neanderthalensis* et son ancêtre *H. heidelbergensis* utilisaient aussi des armes de chasse en bois – ce que prouvent deux trouvailles faites en Basse-Saxe, en Allemagne: les épieux façonnés à Schöningen il y a 300 000 ans et la « lance » découverte à Lehringen, qui a servi il y a 120 000 ans à transpercer un éléphant. Et les Néandertaliens étaient vraisemblablement capables de réaliser aussi des armes composites en fixant des pierres sur des hampes, grâce à des armatures.

Aujourd'hui, les paléanthropologues étudient aussi les performances cognitives des Néandertaliens. À cet égard, la principale >

> problématique est celle de leur capacité à la pensée et à l'action symboliques, en d'autres termes à exprimer leurs pensées par des symboles. La fouille de nombre de leurs habitats nous a appris qu'ils faisaient usage d'ocre et d'oxyde de manganèse et qu'ils ornaient leur corps avec des dents d'animaux, des coquillages et des plumes. Selon certains chercheurs, ils confectionnaient aussi des vêtements et cuisaient des aliments. Il semble aussi qu'ils enterraient leurs morts. Par ailleurs, plus aucun préhistorien ne soutient aujourd'hui la thèse que l'homme anatomiquement moderne a joué un rôle majeur dans la disparition des Néandertaliens. Les Néandertaliens sont réhabilités et les faire passer pour des simples n'est plus possible.

DU GOUDRON IL Y A 200 000 ANS

Pour autant, l'homme de Néandertal était-il supérieur, par certains aspects au moins, à *H. sapiens*? Des préhistoriens tentent de répondre à cette question en comparant les Néandertaliens avec leurs contemporains africains *sapiens*. Ces derniers usaient de pigments à des fins artistiques, chassaient des animaux terrestres ou aquatiques et façonnaient des instruments d'os, mais aussi des armes de chasse spécialisées, dont certaines étaient assemblées à l'aide d'adhésifs. Ces derniers matériaux intéressent particulièrement les préhistoriens, car leurs compositions et leurs modes de fabrication sont encore énigmatiques.

Plusieurs sites africains à traces résiduelles de poix sont connus, mais aucun n'a plus de 100 000 ans. Par contraste, les Néandertaliens d'Europe produisaient déjà il y a 200 000 ans du goudron à partir d'écorces de bouleau (arbre du genre *Betula*). En chauffant la partie blanche de l'écorce, ils la transformaient en une substance ressemblant à du bitume, ou du moins en cette matière goudronneuse qu'est le brai ou la poix de bouleau (voir l'encadré ci-dessous). Les procédés connus pour l'obtenir

GOUDRON OU POIX ?

Lorsqu'on distille du bois de conifère ou de l'écorce de bouleau selon la méthode dite du « double pot », du brai liquide se forme, un mélange peu intéressant en tant qu'adhésif. Ce n'est qu'après une cuisson assez longue qu'il prend en masse et devient du goudron. Distinguer le brai du goudron n'est cependant pas possible dans le cas des adhésifs paléolithiques, car cette distinction n'existe en réalité que dans le cadre de la méthode du double pot, non utilisée pendant la préhistoire, et ne se manifeste pas dans la composition du matériau noir obtenu. C'est pourquoi, tant que l'on ignorera comment le brai de bouleau paléolithique était produit, il restera impossible de discriminer goudron ou poix paléolithiques.

Le brai de bouleau était fixé à des outils de pierre, sans doute afin de mieux les saisir

étant plutôt compliqués, ce savoir-faire représente une importante rupture technologique. Nombre de mes confrères considèrent donc que les Néandertaliens ont eu très tôt les connaissances nécessaires pour mettre au point des procédés thermiques complexes. C'est pourquoi, pour beaucoup de préhistoriens, le brai de bouleau préhistorique joue un rôle clé dans l'estimation des capacités cognitives des Néandertaliens et dans la compréhension de leur mode de vie.

UN PETIT NOMBRE DE VESTIGES ATTRIBUÉS AVEC CERTITUDE AUX NÉANDERTALIENS

Malheureusement, le registre archéologique ne contient que très peu de restes de brai de bouleau qui sont néandertaliens avec certitude. Cinq sont bien connus. Le plus ancien est une masse noire d'environ quatre centimètres de long collée à un outil tranchant de pierre, découverte sur le site de Campitello, en Toscane. Cette espèce de protubérance à la surface de l'outil servait manifestement à en faciliter l'usage. Sur le même site, les fouilleurs ont aussi mis au jour un autre outil lithique, sur lequel adhéraient encore des traces de brai de bouleau.

À Königsau, près de Magdebourg en Saxe-Anhalt, en Allemagne, des préhistoriens allemands ont par ailleurs découvert deux autres fragments de brai de bouleau au sein de couches archéologiques âgées de 84 000 à 40 000 ans. Ces fragments ne contenaient aucun reste d'armature, mais les impressions que l'on y relève suggèrent que ce brai était aussi au contact d'outils, sans doute parce qu'il aidait à les saisir. Enfin, des préhistoriens néerlandais ont découvert en 2016 un autre fragment de brai de bouleau sur un site néandertalien de 50 000 ans à Zandmotor, près de La Haye (voir les photos page 46). Ce fragment aussi adhérait à un outil de pierre, qu'il a dû servir à mieux manipuler.

L'identification chimique des brais de bouleau de Campitello, de Königsau et de Zandmotor s'est faite par chromatographie en



On a longtemps cru que la production de brai de bouleau exigeait de procéder avec de l'air raréfié en oxygène. Les expériences menées à l'université de Tübingen montrent que ce n'est pas le cas. Les chercheurs ont brûlé de l'écorce de bouleau à côté d'une pierre posée un peu plus haut (1); de la poix s'est condensée à la surface de cette pierre (2); on peut récolter cette poix en raclant la pierre (3); il faut en accumuler assez avant de pouvoir en faire usage (4).



phase gazeuse, une technique de séparation des molécules, donc d'analyse chimique, qui permet l'identification d'un matériau par sa composition. Dans les trois cas, l'analyse des échantillons a montré qu'ils contenaient de la bétuline, une substance caractéristique de l'écorce de bouleau. Il s'agit donc bien de brai de bouleau.

Hormis ces fragments bien connus et bien identifiés, on a aussi trouvé des restes de substances adhésives dans quelques autres sites, par exemple à Inden-Altdorf, près d'Aix-la-Chapelle, en Allemagne, dans un site vieux d'environ 120 000 ans. Ces restes n'ayant toutefois pas encore été analysés par chromatographie en phase gazeuse, un doute subsiste sur leur nature. En effet, les humains préhistoriques utilisaient aussi de la résine ou des bitumes naturels comme adhésifs. Or la présence de ces adhésifs naturels n'apporte pas beaucoup de renseignements sur les capacités cognitives des humains qui s'en servaient.



UN TRAVAIL DE ROMAINS ?

Ainsi, les Néandertaliens ont fait usage du brai de bouleau depuis 200 000 ans. D'après les constatations archéologiques, c'était davantage pour modeler des structures de préhension d'outils que pour coller. Très peu de découvertes nous renseignent sur le brai de bouleau des Néandertaliens, mais un fait est néanmoins certain: ils en ont produit et utilisé pendant au moins 150 000 ans. L'énigme de la production de cette matière non naturelle, plastique et collante est bien ce qui rend la découverte de brai de bouleau néandertalien fascinante. Au contraire des bitumes, que l'on puise dans des gisements, le brai – d'après les connaissances actuelles du moins – doit être distillé à partir d'écorce de bouleau en mettant en œuvre un procédé complexe. Pour autant, il n'existe pas de découvertes ni indices permettant de restituer de façon fiable la façon dont les humains de la préhistoire produisaient leur brai de bouleau. Que pouvons-nous dire à ce propos?

Les sources les plus anciennes dont nous disposons sur la production de goudrons >



> proviennent de l'Antiquité. Pliny l'Ancien (23-79) nous apprend que les Romains produisaient du goudron à partir de bois de résineux principalement par la « méthode du double pot ». Elle consiste à faire chauffer du bois (ou de l'écorce) dans un pot de terre, afin d'en extraire la résine sous la forme d'un mélange gazeux, que l'on fait condenser en un liquide qui s'écoule goutte à goutte dans un second pot. En se refroidissant, cette substance s'y transforme en un goudron liquide, que l'on cuit ensuite afin de le transformer en un épais goudron.

DES MÉTHODES COMPLEXES, AVEC PEU D'OXYGÈNE

Une méthode très similaire était aussi employée par les artisans médiévaux pour produire du goudron à partir de bois de résineux et d'écorce de bouleau. Le procédé n'a rien de facile, car il faut veiller à chaque instant à réduire l'alimentation en oxygène pendant que le matériau contenu dans le premier pot chauffe, afin d'éviter que les liquides produits ne brûlent avant de s'écouler. La température du premier pot doit donc être contrôlée à tout instant. Cette façon de décomposer un matériau par augmentation de la température et évitement de la combustion est une « pyrolyse ».

La fabrication de goudron ou de bitume par pyrolyse est exigeante et requiert des connaissances et de la planification. Selon les récentes recherches de Martine Regert et de Maxime Rageot, de l'université Côte d'Azur, à Nice, les Romains produisaient vraisemblablement aussi du brai de bouleau par la méthode du double pot. En revanche, rien ne permet d'affirmer que les Néandertaliens utilisaient cette méthode : la céramique n'existait pas au Paléolithique, et encore moins des équipements capables de maîtriser la présence d'oxygène et la température...

C'est pourquoi, à partir des années 1980, les préhistoriens ont mené des expériences afin d'évaluer comment les humains du Paléolithique ont pu produire du brai de bouleau par des moyens simples. Au cours de tous ces essais, la chauffe des écorces de bouleau s'effectuait en l'absence d'air. Pour ce faire, soit on plaçait les écorces dans une fosse chauffée par un feu installé directement au-dessus, soit on les plaçait en feu dans un petit trou ensuite couvert. Une autre possibilité était de disposer les rouleaux d'écorce sous un tas de braise et de cendre, voire au-dessus d'une cavité creusée dans le sol, dont le contenu en goudron liquide était ensuite cuit à l'aide de bûches incandescentes. Ce dernier procédé est, au fond, proche de la méthode romaine du double pot.

Ces expériences ont réussi en ce sens qu'elles ont effectivement produit des brais de bouleau de consistances diverses selon le processus adopté. Si l'écorce se consumait au sein d'une

structure ressemblant à un récipient, un goudron visqueux était produit ; si elle se consumait dans une structure à deux chambres, une poix plus liquide s'accumulait en plus grande quantité. De façon générale, plus le procédé adopté est complexe, plus on obtient de poix.

Toutes ces techniques doivent être planifiées et se sont révélées difficiles et longues à mettre en œuvre. Elles apparaissent donc comme bien plus complexes que les autres techniques néandertaliennes connues. Nous ne connaissons en effet aucun autre exemple de processus déjà pratiqué il y a environ 200 000 ans et exigeant un contrôle de la température dans un volume dissimulé à la vue. En outre, en supposant que les Néandertaliens aient bien fait appel à un tel procédé, cela impliquerait qu'ils ne l'ont pas découvert fortuitement, mais plutôt mis au point volontairement.

Si l'on fait néanmoins l'hypothèse que les humains de la préhistoire distillaient du brai de bouleau sous des couches d'argile ou dans des fosses creusées dans le sol, deux conséquences s'ensuivent. Premièrement, la production du brai de bouleau serait l'une des formes de production les plus exigeantes de toute la préhistoire et certainement la plus complexe au moment de son invention. Deuxièmement, les Néandertaliens auraient les capacités cognitives nécessaires à la mise en œuvre d'un procédé incluant des étapes invisibles et hors de contrôle direct, donc apparemment une cognition supérieure à celles des *Homo sapiens* contemporains d'Afrique.

Est-ce plausible ? L'ensemble des faits connus sur les Néandertaliens ne donne pas vraiment cette impression. Dès lors, se dit-on, les Néandertaliens ont dû avoir des méthodes de production du brai de bouleau moins complexes. Mais lesquelles ? Pour tenter de progresser dans la résolution de cette énigme, en 2018, l'université de Tübingen y a consacré un projet international d'archéologie expérimentale. J'en faisais partie.



Il est peu probable que les Néandertaliens aient maîtrisé des techniques de type pyrolyse

Le but de nos expériences était de produire du brai de bouleau de la façon la plus simple possible. Le processus ne devait donc pas être souterrain, mais se dérouler constamment à la vue. Nous voulions déterminer la plausibilité de l'idée que les Néandertaliens aient pu découvrir une technique par hasard. Cela nous a amenés à refuser l'idée répandue selon laquelle le brai de bouleau ne peut être produit qu'en atmosphère raréfiée en oxygène.

UNE PISTE GRÂCE À UNE OBSERVATION FORTUITE

En 2016, des études menées sur un autre sujet avaient montré que des goudrons de bois se forment parfois au sein de foyers. Avec des collègues de mon université, j'avais en effet étudié comment, il y a 100 000 ans en Afrique du Sud, des chasseurs-cueilleurs faisaient chauffer certaines pierres sur la braise afin d'en améliorer la qualité avant son débitage en outils. Au cours de ces travaux, >

RECONSTITUER LA PRODUCTION DE POIX DE BOULEAU

Depuis les années 1980, des chercheurs essaient de reconstituer la façon dont les Néandertaliens produisaient du brai de bouleau. Les méthodes expérimentales supposaient des conditions dans lesquelles le brai de bouleau se forme sous atmosphère raréfiée en oxygène. En 2017 par exemple, Geeske Langejans et Paul Kozowyk, de l'université de Leyde, aux Pays-Bas, ont mené trois essais de production de brai de bouleau par les méthodes décrites ci-dessous. Au cours de ces essais, les températures ont varié entre

250 °C et plus de 500 °C, selon le processus. Les auteurs de cette expérience ont constaté que c'est seulement dans cette gamme de températures que du brai de bouleau est produit. Les chercheurs de Tübingen, eux, ont essayé de produire de la poix par la méthode de la condensation : ils ont fait brûler de l'écorce de bouleau à côté d'une grosse pierre, qu'ils ont ensuite raclée (voir les photos page 49). La méthode de la condensation produit beaucoup moins de brai : 100 grammes d'écorce ne donnent que 0,18 gramme de brai.

1 Tas de cendre

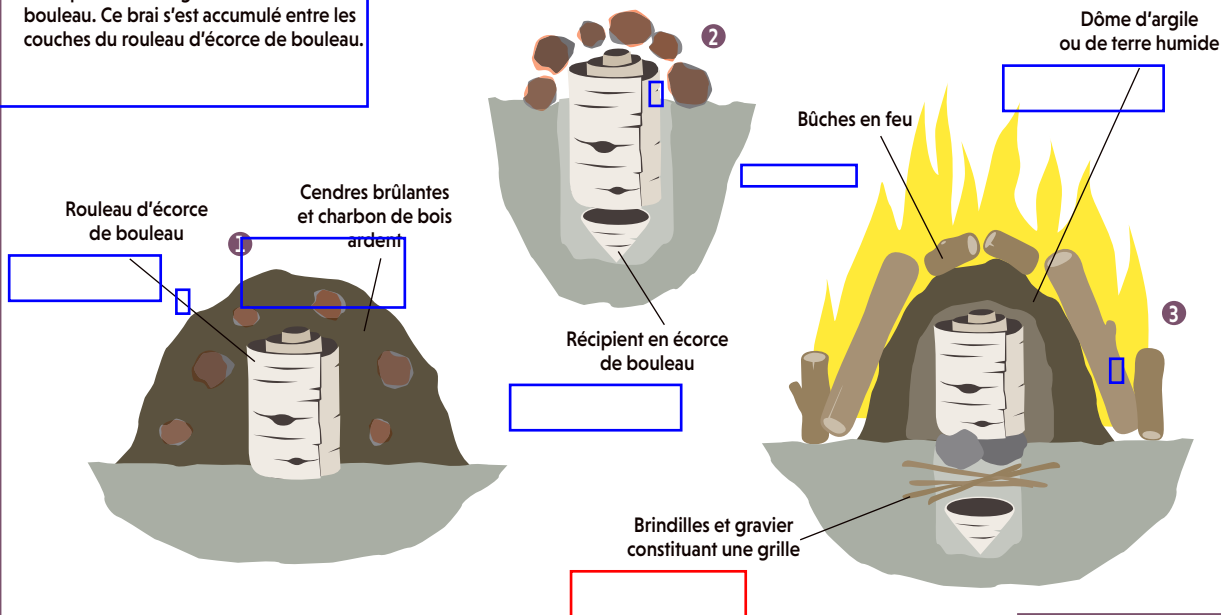
Dans cette méthode, les chercheurs enroulent de l'écorce de bouleau sur elle-même, puis attachent le rouleau obtenu avec un fil en fibres de bois, afin qu'il ne se déroule pas. Ils le déposent ensuite par-dessus des braises et des cendres afin que l'air ne puisse atteindre l'écorce. Ce faisant, ils doivent porter une attention particulière à la proportion de cendres et de braises. Un excès de chaleur consomme l'écorce ; un excès de cendres, en revanche, abaisse la température et alors plus aucun goudron n'est produit. Les expérimentateurs néerlandais qui ont testé cette méthode ont obtenu environ 1 gramme de brai relativement dur à partir de 100 grammes d'écorces de bouleau. Ce brai s'est accumulé entre les couches du rouleau d'écorce de bouleau.

2 Un rouleau dans un trou

Dans un petit trou creusé dans le sol, les archéologues placent un récipient en écorce de bouleau. Puis ils y mettent un rouleau d'écorce de bouleau avant de recouvrir l'ensemble de charbons ardents. Contrairement au cas de la précédente méthode, ils n'ont pas ici à contrôler la température et l'arrivée d'air. Le goudron s'accumule dans le récipient de bouleau. Avec 100 grammes d'écorce de bouleau, ils ont ainsi produit 2,4 grammes d'un mélange mou.

3 Production sous argile

Cette méthode est particulièrement complexe. Les expérimentateurs creusent un trou et y placent un récipient en écorce de bouleau de la taille d'une tasse. Ils disposent au-dessus un entrelacs de fines branches, puis des cailloux et un rouleau d'écorce au-dessus avant de construire un dôme de terre humide par-dessus sur lequel ils allument un feu de bûches. Cette méthode est la plus productive : avec 100 grammes de bouleau, 9,6 grammes de poix ont été obtenus.



UNE GOMME À MÂCHER PALÉOLITHIQUE

La poix de bouleau est une matière collante. C'est pourquoi les populations du Néolithique l'ont utilisée comme colle – par exemple pour fixer une pierre à un manche afin d'obtenir une arme de chasse, ou encore pour équiper les flèches d'empenages. Mais comme l'illustre un morceau de poix de bouleau découvert sur l'île danoise de Lolland, nos ancêtres s'en servaient aussi comme gomme à mâcher. En effet, il y a quelque 5 700 ans, une jeune femme a mastiqué la masse informe constellée de marques de dents montrée ci-dessous et étudiée en 2019 par l'équipe de Theis Jensen, de l'université de Copenhague. Les préhistoriens soupçonnaient depuis longtemps que les humains du Néolithique mâchaient de la poix de bouleau. C'était peut-être pour eux une façon de maintenir la souplesse et la plasticité du matériau, à moins qu'il ne se soit agi d'un passe-temps, ou d'un soin contre les maux de dents, puisque certains des composants du brai de bouleau ont des vertus antiseptiques. Quoi qu'il en soit, Theis Jensen et ses collègues ont réussi à extraire de l'échantillon la quasi-totalité de l'ADN de la mâcheuse de chewing-gum, et établi qu'elle avait la peau noire et les yeux bleus. Son génome ressemble fortement à celui des chasseurs-cueilleurs du Mésolithique, qui vivaient peut-être alors sur le même territoire que les populations néolithiques. Ainsi, il semble que la peau claire ne se soit établie que tardivement à la latitude du Danemark. Les paléogénéticiens ont aussi découvert au sein du brai mâché des traces de l'agent pathogène *Porphyromonas gingivalis*, associé à une forme grave de parodontite, ainsi que des fragments de virus Epstein-Barr, à l'origine de la mononucléose infectieuse. L'ADN découvert dans l'échantillon livre aussi des informations sur les repas récents de la jeune femme : il semble qu'avant de mâcher de la poix de bouleau, elle ait mangé des noisettes et du canard colvert.



> j'ai eu l'occasion d'observer, fortuitement, qu'il arrivait qu'une sorte de goudron de bois se dépose sur ces pierres.

C'est cette observation qui nous a mis sur la piste. Lors de notre campagne expérimentale à Tübingen, nous avons récolté des rouleaux d'écorce sur des bouleaux, puis nous les avons placés juste à côté d'une grosse pierre dont une face dominait légèrement. Nous avons ensuite lancé la combustion de l'écorce en nous appuyant sur le fait que la couche blanche de sa surface brûle toujours très bien, même quand elle est humide ; cela suggère que les humains de la préhistoire l'utilisaient aussi pour allumer leurs feux. Nous avons constaté qu'au cours de la combustion de l'écorce, un mince film de poix se condensait directement sur la pierre, formant une masse noire que nous avons ensuite détachée avec un outil de pierre. Cette façon de s'y prendre déclenche aussi une pyrolyse, mais sans que l'on ait à contrôler la température en permanence.

La poix ainsi obtenue est collante et visqueuse. Elle a les mêmes propriétés mécaniques que le brai de bouleau cuit et produit sous atmosphère raréfiée en oxygène. La méthode exploitant la condensation fonctionne malgré un apport d'air constant, et l'on peut observer ce qui se passe ! C'est un point

crucial, car il permet d'envisager que les Néandertaliens aient pu découvrir cette méthode par hasard, par exemple quand, assis autour du feu, ils voyaient le morceau d'écorce de bouleau ayant servi à allumer le feu en train de se consumer près d'une pierre. Un tel procédé de production du brai est aussi facile à imiter, ce qui permet de produire volontairement de la poix de bouleau en grande quantité. Si plusieurs pierres et rouleaux d'écorce brûlants sont utilisés en même temps, il est possible de racler en quelques heures une quantité suffisante de goudron pour former une masse de taille centimétrique, comparable à celle de Königsau.

LE PROCÉDÉ N'ÉTAIT PAS NÉCESSAIREMENT COMPLEXE

Ces expériences ont donc réfuté l'idée que l'on ne peut produire de brai de bouleau qu'en atmosphère raréfiée en oxygène, ce qui nous pousse à donner une autre interprétation aux observations faites jusqu'ici. Certes, nous ignorons toujours comment les Néandertaliens obtenaient leur brai, mais nous savons qu'ils ne le produisaient pas forcément par un procédé complexe. Divers scénarios sont envisageables. Ils ont pu par exemple découvrir d'abord la méthode par condensation, puis, l'ayant développée, la transformer en un procédé supposant un enfouissement de l'écorce en train de se consumer. Il est aussi possible que la condensation de brai de bouleau à l'air libre ait été observée à plusieurs reprises, par des observateurs différents, dont chacun a ensuite développé sa propre méthode. Ou encore, il se peut qu'au Paléolithique, personne n'ait jamais produit de brai de bouleau sous oxygène raréfié !

De tout cela, nous ne pouvons pas encore tirer de conclusions définitives sur les efforts cognitifs fournis par les Néandertaliens pour produire du brai de bouleau. Nous savons cependant déjà que la production d'autres objets de la culture matérielle des Néandertaliens suppose qu'ils avaient la capacité de planifier. Le fait qu'ils aient été capables de produire et d'utiliser du brai de bouleau en témoigne tout particulièrement. Notre résultat a aussi des conséquences très générales en archéologie paléolithique. La comparaison de classes d'objets similaires, autrefois utilisées par différentes formes humaines, ne dit rien sur la façon dont elles ont produit ces artefacts. Comme on le sait, de nombreux chemins mènent à Rome : des objets semblables peuvent avoir été produits par des méthodes très différentes. Les capacités des innovateurs ne peuvent donc être déduites des industries qu'ils pratiquaient seulement si l'on connaît précisément leurs méthodes. Dans le cas des brais néandertaliens, ce n'est pas le cas. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Schmidt et al., **Birch tar production does not prove Neanderthal behavioral complexity**, *PNAS*, vol. 116(36), pp. 17707-17711, 2019.

M. Rageot et al., **Birch bark tar production : Experimental and biomolecular approaches to the study of a common and widely used prehistoric adhesive**, *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 26(1), pp. 276-312, 2019.

P. R. B. Kozowyk et al., **Experimental methods for the Palaeolithic dry distillation of birch bark : implications for the origin and development of Neanderthal adhesive technology**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 8033, 2017.

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 pouirlascience.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 :

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

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

PAG21STD

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

☐ **FORMULE
PAPIER**

• 12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %

DPV4E90

☐ **FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE**

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

6,50€
PAR MOIS
-31 %

PPV6E50

☐ **FORMULE
INTÉGRALE**

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

8,20€
PAR MOIS
-43 %

IPV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tél. :

E-mail :@.....

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

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

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

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

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

4 / **MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

UN SOLEIL EN FORME DE TORE

Des ingénieurs travaillent sur la première section de la chambre à vide – l'enceinte toroïdale qui accueillera le plasma. Dans le réacteur ITER, la fusion nucléaire sera réalisée au sein du plasma par deux isotopes de l'hydrogène: le deutérium et le tritium. En raison de la très haute température, ces noyaux entreront en collision à grande vitesse et, parfois, se lieront pour former un noyau d'hélium. Une partie de la masse des réactifs sera alors convertie en énergie suivant la fameuse équation d'Albert Einstein, $E = mc^2$.





Iter, l'assemblage d'un géant

La construction d'Iter, qui constituera la plus grande expérience de fusion nucléaire, est un défi technologique d'envergure.

La phase d'assemblage de ce réacteur a démarré il y a quelques mois. Aperçu en images.

L'AUTRICE



CLARA MOSKOWITZ
journaliste et éditrice
à *Scientific American*

Photographies
de Manuela Schirra
et Fabrizio Giraldi

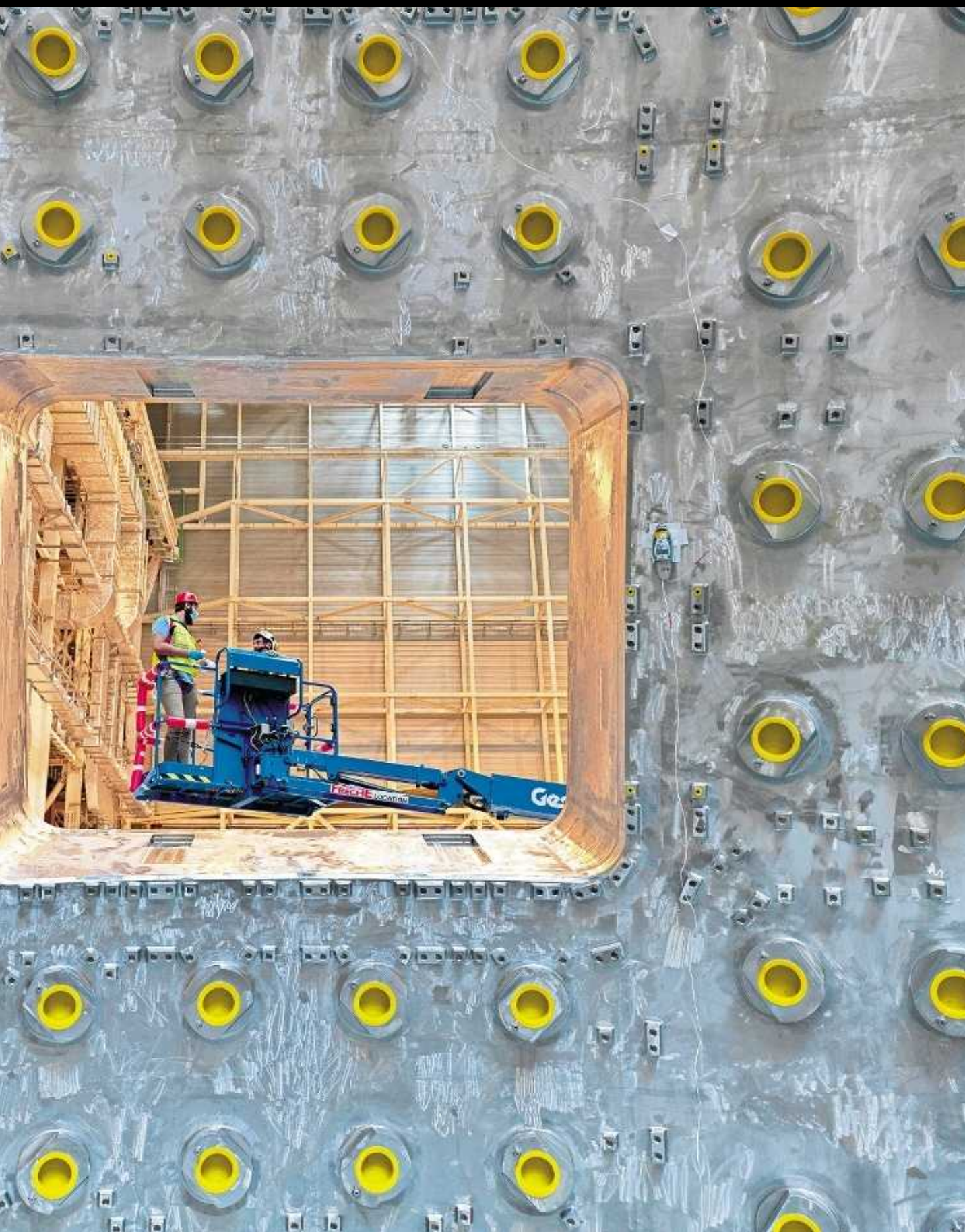
La fusion nucléaire, le processus qui alimente le Soleil, offrira à l'humanité une énergie propre et illimitée... si l'on parvient à la contrôler. Iter, acronyme anglais de « Réacteur thermonucléaire expérimental international », est la tentative la plus ambitieuse pour domestiquer cette énergie. Ce projet de 20 milliards d'euros est en train de voir le jour sur le site de Cadarache, près de Saint-Paul-lès-Durance, dans le sud de la France. Il est le fruit d'une collaboration internationale entre l'Union européenne, la Chine, le Japon, l'Inde, la Corée du Sud, la Russie et les États-Unis. Le défi que représente Iter est de construire une sorte d'étoile miniature dans un laboratoire et de contrôler sa dynamique. Le cœur de l'expérience est une structure de 23 000 tonnes dans laquelle de puissants aimants supraconducteurs devront confiner un plasma à 150 millions de degrés assez longtemps pour amorcer des réactions de fusion. Son objectif est de réussir pour la première fois ce qu'aucune expérience de ce type n'est parvenue à faire jusqu'à présent : produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

Le projet a connu de nombreux obstacles : des retards répétés, un budget dépassant largement les prévisions, etc. Pour ses opposants, Iter est une perte de temps et d'argent, cette expérience n'étant pas destinée à une production industrielle d'énergie mais devant juste servir de preuve de concept. Cependant, malgré ces difficultés, Iter a entamé en juillet 2020 une étape symbolique et cruciale : l'assemblage du réacteur. Les équipes commencent à monter les différents éléments fabriqués par les pays membres. « Nous avons le même état d'esprit qu'un coureur qui a prévu de participer à plusieurs marathons et qui vient de finir le premier. Il sait qu'il a encore d'autres épreuves devant lui, commente Bernard Bigot, directeur général d'Iter depuis 2015. Nous avons confiance en l'avenir du projet, mais nous savons que rien n'est acquis à l'avance. » ■

DES TEMPÉRATURES EXTRÊMES

Un plasma chauffé à près de 150 millions de degrés cohabitera avec des aimants refroidis à une température de 4 kelvins (-269°C). Leur puissant champ magnétique confinerait et contrôlerait le plasma. Ces aimants seront séparés du plasma par une « couverture » composée de 440 plaques pour une superficie totale de 600 mètres carrés. Ces éléments en acier et en cuivre seront directement exposés à la chaleur du plasma et aux neutrons émis par les réactions de fusion. Ils seront recouverts de béryllium pour limiter la contamination du plasma. Ces boucliers thermiques seront fixés à une structure en acier (ci-contre) grâce à des points d'attache qui sont, pour l'instant, protégés de la poussière par des capuchons jaunes.







UN GÉANT MONDIAL

En 1957, le physicien Igor Golovin a développé le concept de tokamak, un acronyme russe pour «chambre toroïdale à bobines magnétiques». Le réacteur Iter sera le plus grand tokamak jamais construit (deux fois plus grand que tous les tokamaks actuellement opérationnels). Il sera installé dans l'enceinte cylindrique vue ici d'en haut (*ci-dessus*) et à mi-hauteur (*ci-contre*). La base de la machine a été déposée dans le fond de l'enceinte en juillet 2020. Cette opération a marqué le début de la phase d'assemblage sur le site de Cadarache, un centre financé par l'Union européenne, laquelle contribue à hauteur de 50 % du coût total du projet.





UNE ENCEINTE SOUS VIDE

La chambre à vide d'Iter sera composée de six segments, fabriqués en Corée du Sud et en Italie. Les gigantesques sections d'acier ont été transportées par bateau jusqu'au port de Fos-sur-Mer, puis par route sur 100 kilomètres pour rejoindre le site de Cadarache. Alors que les premiers éléments sont arrivés, les équipes se préparent à les connecter aux aimants et aux boucliers thermiques avant de les descendre dans l'enceinte du tokamak.

PRÈS DU ZÉRO ABSOLU

Les aimants supraconducteurs du réacteur devront opérer à des températures proches du zéro absolu. Dans ces conditions, le courant électrique y circule avec une résistance nulle, ce qui permet de produire des champs magnétiques très intenses. Ces basses températures sont obtenues grâce à un système cryogénique à l'hélium liquide. Les opérateurs contrôlent le système via un jeu complexe de vannes manuelles et des capteurs de pression, température et débit (ci-contre, en haut). Le dispositif de refroidissement, conçu par Air Liquide, sera le plus grand système de refroidissement cryogénique du monde (ci-contre, en bas) après celui du LHC (le Grand collisionneur de hadrons), au Cern.





UNE CAGE MAGNÉTIQUE

Le plasma d'Iter sera spatialement confiné dans le tokamak grâce à un ensemble d'aimants. Cet ensemble comprendra six anneaux horizontaux (l'un d'eux est photographié ci-dessus) empilés les uns sur les autres et enserrant la chambre à vide. Ces aimants supraconducteurs produiront le champ magnétique poloïdal (dont les lignes de champ sont perpendiculaires au plan de l'anneau). Les 18 bobines verticales (hautes de 17 mètres et larges de 7 mètres, pesant chacune 360 tonnes) qui s'enroulent autour du tore de la chambre à vide engendreront le champ toroïdal (lignes de champ dirigées le long de l'anneau). Un grand solénoïde occupera le centre de ce tore. Créant un champ magnétique de 13 teslas, il aura pour fonction d'induire et de maintenir le courant plasma. Enfin, 18 bobines de corrections compenseront certaines imperfections du système global. L'ensemble constituera le plus grand système d'aimants supraconducteurs du monde.



DES AIMANTS FABRIQUÉS SUR PLACE

Quatre des six aimants poloidaux, composés d'alliages de niobium-fer et de niobium-titane, sont les seuls éléments d'ITER fabriqués sur place. De diamètre compris entre 17 et 24 mètres et d'une masse de 400 tonnes chacun, ils sont trop grands pour être produits ailleurs et transportés. Ci-dessous, l'aimant n°6 photographié dans son cryostat de refroidissement.



EN SAVOIR PLUS

Le site Internet d'ITER :
www.iter.org/fr/accueil

L'ESSENTIEL

> Les stratégies pour lutter contre le réchauffement planétaire s'appuient fortement sur les végétaux (biomasse), capables d'extraire le dioxyde de carbone de l'atmosphère.

> La bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECSC) est une technologie prometteuse pour exploiter la biomasse à des fins énergétiques, car elle piège et stocke définitivement le dioxyde de carbone dans le réservoir géologique.

> Le déploiement de la BECSC pour contenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5 °C nécessiterait toutefois une augmentation des surfaces en forêts, en prairies et en cultures qui dépasse les limites de la planète.

> La biomasse peut jouer tout de même un rôle positif si l'on réduit la demande et si l'on augmente l'offre à l'aide de techniques d'agroforesterie.

LES AUTEURS



ERIC TOENSMEIER
maître de conférences à l'université Yale, aux États-Unis, et chercheur associé pour les ONG Project Drawdown et Global EverGreening Alliance



DENNIS GARRITY
président de l'ONG Global EverGreening Alliance, anciennement chercheur associé au World Agroforestry Centre et au World Resources Institute

La piste de la biomasse pour piéger le CO₂

Les scénarios visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C s'appuient sur le déploiement à grande échelle du captage et stockage du carbone par l'intermédiaire des végétaux. Pas si simple ni si facile !

Dans la plaine agricole autour de Decatur, dans l'Illinois, un camion à benne rempli d'épis de maïs pénètre dans un entrepôt de l'usine de production d'éthanol d'Archer Daniels Midland, une multinationale de l'agroalimentaire. Le maïs est déversé dans de grandes cuves de fermentation où il est transformé en bioéthanol. Cette fermentation libère du dioxyde de carbone qui est récupéré et acheminé par gazoduc vers un puits. Là, des pompes le propulsent en profondeur au sein d'une roche sédimentaire (grès) où il se trouve piégé durablement. Quant au bioéthanol produit, il sera transporté par camion dans une raffinerie pour y être mélangé à de l'essence, puis distribué à la vente.

Le projet mené dans l'usine de Decatur arrive au terme d'un essai de trois ans, mis en

place pour évaluer une nouvelle technique, dite de « bioénergie avec captage et stockage du carbone » (BECSC), destinée à extraire du dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère. Le principe testé à Decatur est le suivant. Pendant leur croissance, les plants de maïs absorbent le CO₂, qui est ensuite récupéré lors de la fermentation, injecté puis stocké dans la roche. Le coût de l'opération devrait être compensé par la vente du bioéthanol.

La production de maïs destinée aux biocarburants s'est accélérée aux États-Unis dans les années 2000, mais elle est controversée. D'abord, elle utilise des terres que l'on pourrait, sinon, cultiver pour nourrir la population ou le bétail. Ensuite, la combustion de l'éthanol dans les voitures rejette toujours du dioxyde de carbone, même si c'est en moindre quantité. Il en va de même pour le moissonnage et le transport du maïs. Enfin, l'étape de fermentation >

Les eucalyptus dans le KwaZulu-Natal, en Afrique du Sud, s'élançant vers le ciel. Ces arbres produisent rapidement du bois, mais limitent la biodiversité. Une forêt d'eucalyptus contient deux fois moins d'espèces végétales différentes qu'une forêt de chênes ou de châtaigniers du même âge, d'après une étude menée par l'institut FCBA (Forêt, cellulose, bois, ameublement).



> ainsi que, dans le cas de l'usine expérimentale de Decatur, la construction du gazoduc et l'injection du CO₂ en profondeur, nécessitent de l'énergie. Cette énergie provient, dans l'Illinois en tout cas, de combustibles fossiles. Dès lors, l'intérêt écologique du projet ne coule pas de source. D'où la question: la production d'éthanol à partir du maïs contribue-t-elle, même un tant soit peu, à diminuer la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique?

L'usine de Decatur, qui abrite le plus grand essai de BECSC au monde, fonctionne à partir de grains de maïs. Mais dans la plupart des essais en cours ou des projets (aux États-Unis, aux Pays-Bas, en Norvège, au Canada, etc.), la matière première est constituée de plantes non alimentaires. Ce sont des arbres, des arbustes ou des herbacées qui sont soit transformés en combustibles liquides soit brûlés pour produire de l'électricité. Le CO₂ émis est isolé et capté, puis stocké dans le sous-sol ou, parfois, directement réutilisé. En effet, ses applications industrielles sont nombreuses: boissons gazeifiées, traitement des métaux, fabrication d'engrais, récupération assistée du pétrole (le CO₂ est injecté dans les puits afin d'en extraire plus de pétrole), etc. On parle alors de BECCU (bioénergie avec captage de carbone et utilisation). Dans les deux cas, l'idée est que le piégeage du CO₂ soit une opération financièrement neutre grâce à la vente directe du CO₂ ou d'un produit dérivé commercialement viable (biocarburant, électricité ou autre).

En grande partie ignorée il y a dix ans, la biomasse se voit aujourd'hui attribuer un rôle majeur dans les grands programmes destinés à atténuer le réchauffement climatique, que ce soit dans le rapport « Réchauffement planétaire de 1,5 °C » du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), publié en 2018, dans « Changement climatique et terres émergées », de 2019, également publié par le Giec, dans le rapport d'évaluation nationale du climat des États-Unis, « Fourth National Climate Assessment », publié en 2018, ou dans les scénarios défendus par l'ONG (organisation non gouvernementale) Project Drawdown dans son rapport « The Drawdown Review », paru en 2020.

Les applications de la biomasse sont déjà nombreuses et la liste ne cesse de s'allonger: production de biocarburants, d'électricité, de chaleur, de méthane (dans des biodigesteurs, où des bactéries digèrent des déjections), de biochar (charbon obtenu par pyrolyse de résidus végétaux et destiné à améliorer la qualité des sols), de matériaux d'isolation et de construction (chanvre, lin, laine...) et de bioplastiques... En outre, les grandes industries de l'électricité, du pétrole et du plastique misent également gros sur la biomasse en tant que matière première, ce qui fait monter en flèche la demande en biomasse.

Tous les programmes climatiques se fondent sur le consensus scientifique suivant.

Pour garder un climat compatible avec notre civilisation, le réchauffement planétaire doit être limité à 1,5 °C. Dès lors, il faut diminuer les émissions anthropiques de CO₂ de 45% d'ici à 2030 et de 100% à l'horizon 2050. En d'autres termes, il ne faut pas dépasser le budget carbone (la somme des émissions depuis l'époque préindustrielle) restant de l'humanité, estimé entre 420 et 580 gigatonnes de CO₂.

Cela impose non seulement de réduire les émissions, mais aussi d'extraire directement du CO₂ de l'atmosphère. Selon le Giec, les techniques de BECSC pourraient piéger entre 0,4 et 11,3 gigatonnes de CO₂ par an. Quant à Project Drawdown, cette ONG évalue à entre 1,1 et 2,5 gigatonnes la quantité de CO₂ que la biomasse pourrait capter, *via* l'ensemble de ses usages (hors BECSC, car ses stratégies n'en font pas état).

La biomasse aiderait-elle à résoudre le problème du réchauffement de la planète? Ce n'est pas si simple. Le hic est que ces programmes sont fondés sur l'hypothèse que la biomasse est disponible à profusion. Or c'est loin d'être le cas. Pour sauver notre climat, il faudrait produire des quantités colossales de biomasse en plus; cela nécessiterait des étendues de terres... qui n'existent tout bonnement pas. En effet, le déploiement de la BECSC à grande échelle requerrait, à elle seule, 300 à 700 millions d'hectares (Mha), selon le Giec, soit une superficie comprise, peu ou prou, entre celles de l'Inde (328 Mha) et de l'Australie (769 Mha).

Le déploiement de la BECSC à grande échelle exigerait une superficie supérieure à celle de l'Inde

Le problème est de taille, d'autant que la plupart des terres adéquates pour produire davantage de biomasse sont déjà utilisées pour l'agriculture. Ainsi, le développement à grande échelle de la biomasse entrerait inévitablement en conflit avec la nécessité de conserver des terres agricoles pour l'alimentation et des



Les caféiers cultivés dans les montagnes des Andes équatoriennes prospèrent sous des arbres qui leur procurent à la fois de l'ombre et une litière de feuilles qui fertilise le sol.

pâturages. Or l'avenir des terres fait déjà l'objet de conflits exacerbés. Faut-il consacrer plus de terres au soja afin de nourrir le bétail et répondre ainsi à la demande croissante en viande? Ou les dédier à la biomasse pour produire des biocarburants?

Le développement à grande échelle de la biomasse soulève un autre problème. Il menacerait les forêts, qui risqueraient d'être remplacées par des plantations d'eucalyptus ou de pins, des espèces à croissance rapide – autant de vastes monocultures dommageables à la biodiversité.

Le Giec et les autres organismes préconisent des pratiques agricoles contribuant au piégeage du carbone dans les sols (*voir l'encadré page 69*) et la reforestation, mais ils mettent surtout en avant la technologie BECSC, qu'ils considèrent comme majeure, quand bien même il n'existe que cinq projets dans le monde (selon le Global carbon capture and storage institute) et que son efficacité reste à démontrer.

Or, nous l'avons vu, aussi prometteuse soit-elle, la BECSC soulève un épineux problème: le Giec et les autres prônent si résolument le développement de la biomasse que la demande explose. Tout se passe comme s'ils avaient mis tous leurs œufs dans le même panier, ou presque. C'est une stratégie risquée. Une ruée vers la biomasse est désormais lancée à travers le monde, et, à moins de changements drastiques dans les programmes climatiques,

gouvernements et industries risquent d'entrer en conflit. Mais il nous semble qu'un développement modéré de la biomasse pourrait être viable. Certaines approches, hybrides, que nous décrivons, pourraient même augmenter les rendements des cultures, en même temps que la production de plantes ligneuses.

LA BIOMASSE, NOUVEL OR VERT

Notre espèce a toujours compté sur la biomasse, notamment les plantes ligneuses, pour satisfaire ses besoins élémentaires. Pour construire des maisons, des navires, pour fabriquer des outils, du papier, pour tisser des textiles... Pour se chauffer aussi ou cuisiner. Aujourd'hui, plus de trois milliards de personnes cuisinent toujours, quotidiennement, au feu de bois. Notre espèce prélève toujours plus, sans se poser de questions.

À partir de la moitié du XIX^e siècle, nos sociétés ont commencé à passer du bois aux combustibles fossiles (charbon, tourbe, pétrole, gaz naturel...). Cette transition a assuré notre prospérité, mais elle nous a également menés vers la catastrophe climatique qui se profile.

Aujourd'hui, la majeure partie de la biomasse exploitée provient des arbres, des herbacées et des résidus de récolte tels que les tiges de maïs – de la biomasse dite «lignocellulosique». Elle est, dans une certaine mesure, renouvelable: elle pousse; elle est récoltée; elle pousse de nouveau, etc. De ce fait, elle est ➤



Les bamboueraies (ici, la forêt de bambous géants d'Arashiyama à Kyoto, au Japon), absorbent quatre fois plus de dioxyde de carbone qu'une forêt « classique ». En outre, le bambou sert à fabriquer des maisons, des meubles, des tissus, de la pâte à papier, etc. À lui seul, il compte plus de 1 500 possibilités d'utilisation. Les pousses servent aussi dans l'alimentation humaine et les cosmétiques.

> intéressante pour lutter contre le réchauffement climatique.

Toute la problématique réside dans le volume nécessaire. Pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C ou 2 °C, le Giec évalue qu'il faudrait extraire 100 à 1 000 gigatonnes de CO₂ de l'atmosphère au cours du XXI^e siècle, et donc dédier, comme nous l'avons vu, pour la seule BECSC, 300 à 700 millions d'hectares de terres à la biomasse. Or il est inconcevable de convertir de telles surfaces agricoles à la biomasse, sous peine de ne plus subvenir aux besoins alimentaires sans cesse croissants de l'humanité.

Il est également délicat de trouver de nouvelles terres cultivables. Certaines, précédemment abandonnées, pourraient être de nouveau exploitées, mais on les utilise déjà en grande partie pour y faire paître du bétail. Par conséquent, il risque de devenir inévitable d'empiéter sur la forêt, bien que les programmes climatiques ne le préconisent pas.

Selon nous, raser des forêts pour y implanter des plantes à croissance rapide serait contraire au but recherché. Les forêts constituent d'importants puits de carbone et la déforestation est déjà responsable de 9 % des émissions anthropiques. Pour réduire le CO₂ et préserver la biodiversité, les forêts doivent, au contraire, être protégées et étendues. En ce

sens, les stratégies présentées par l'ONG Project Drawdown se démarquent des autres, car elles retiennent seulement les sources de biomasse qui ne compromettent ni la sécurité alimentaire ni la pérennité des forêts.

Notons que même les pistes pour limiter le réchauffement à 1,5 °C n'impliquant pas de BECSC nécessitent des quantités de biomasse exorbitantes. La boulimie actuelle pour les biocarburants, elle non plus, ne peut pas s'inscrire dans une démarche durable : il n'existera jamais assez de terres cultivables pour produire les matières premières nécessaires au remplacement des quantités gigantesques de carburant que nous utilisons. Si 100 % du maïs cultivé aux États-Unis était transformé en éthanol, cela ne permettrait de satisfaire que 25 % de la demande en carburant du pays et... il ne resterait plus un grain de maïs pour nourrir la population et le bétail.

Pour évaluer le niveau de déploiement de la technologie BECSC compatible avec un maintien durable de la production alimentaire mondiale, nous avons analysé la quantité totale de biomasse utilisée dans le monde en 2015, tous domaines confondus. Puis nous avons calculé la demande attendue d'ici à 2050, en nous appuyant sur l'hypothèse soit d'un niveau faible de BECSC, soit d'un niveau élevé (selon les rapports précédemment cités).

Dans les deux scénarios (voir l'encadré page 70), l'augmentation des ressources en bio-

masse, seule, ne peut pas répondre à la demande sans déforestation. En outre, une réduction de la demande ne suffit pas non plus : les besoins en biomasse dépassent toujours les capacités de la planète. Ce n'est qu'au prix de réductions drastiques de la demande, au-delà des projections envisagées, et d'augmentations tout aussi drastiques de filières de production bien spécifiques qu'il pourrait être possible de fournir la biomasse nécessaire – et seulement dans le cas d'un niveau faible de BECSC. Dans le cas d'un niveau élevé de BECSC, il faudrait 450 millions d'hectares de terres supplémentaires, soit une superficie supérieure à celle de l'Union européenne.

Le scénario du niveau faible de BECSC est envisageable, mais il soulève des préoccupations sociales majeures. En effet, une grande partie des terres qui seraient nécessaires pour déployer cette technologie sont aujourd'hui cultivées par de petits exploitants, utilisées comme pâturages ou couvertes par des forêts, où vivent parfois des peuples indigènes. Le risque que ces forêts soient saisies contre leur gré les guette. Ces dernières années, quelque 12 millions de personnes dans le monde se sont ainsi déjà vu voler leurs terres, notamment en Asie du Sud-Est et au Brésil, pour y planter des palmiers à huile et, en Afrique, des cacaoyers.

RÉDUIRE LES BESOINS

Nous avons montré qu'en réduisant sévèrement la demande en biomasse tout en en développant des modes de production durables, il serait possible de réduire le CO₂ atmosphérique sans nuire à l'approvisionnement alimentaire ni à la pérennité des forêts.

La première étape consiste à diminuer la consommation actuelle de biomasse. Le recyclage du papier réduit déjà la quantité de bois nécessaire à la fabrication de pâte à papier de 484 millions de tonnes (Mt) par an. Compte tenu de la croissance du recyclage, Project Drawdown prévoit que ce chiffre passera à 1 100 Mt par an d'ici à 2050. Cette ONG estime également que le remplacement des foyers de cuisson à bois traditionnels par des cuisinières plus « propres » (des poêles à charbon de bois à haut rendement, des poêles à gaz naturel, des poêles à énergie solaire...) réduirait encore la consommation de bois de 1 700 Mt par an d'ici à 2050. De telles cuisinières diminueraient en outre la fumée domestique, ce qui serait bénéfique pour la santé.

Actuellement, une grande partie de la biomasse non exploitée est jetée aux ordures. Or ces rebuts constitueraient une fructueuse source de matières premières pour produire de l'énergie, qu'il s'agisse des déchets issus de la transformation du bois, des aménagements

et des entretiens de jardins (tonte de gazon, feuilles, branchages...), mais aussi de tout ce qui reste après les récoltes, comme les tiges et feuilles du maïs. Environ un quart de ces résidus de culture sert déjà à nourrir le bétail ou à améliorer les pratiques agricoles (paillage, litière pour le bétail, incorporation aux sols, etc.). On estime qu'il serait bénéfique >

STOCKER LE CO₂ DIRECTEMENT DANS LES SOLS

Dans son rapport « Réchauffement planétaire de 1,5 °C », publié en 2018, le Giec propose de recourir à des technologies dites « à émissions négatives » pour compenser le trop-plein de CO₂ atmosphérique. Elles consistent à capter le CO₂ pour le piéger dans des réservoirs géologiques – l'inverse de ce qui se passe quand nous utilisons des énergies fossiles.

L'une de ces technologies, qui passe par la production de bioénergie (BECSC), est critiquée, à juste titre, car il paraît difficile de produire suffisamment de biomasse à l'échelle mondiale au regard des quantités de carbone à piéger. Il existe des alternatives (biochar, captage direct du CO₂ dans l'air, etc.) – certaines sont décrites dans l'article ci-contre, par exemple l'agroforesterie –, qui rentrent moins directement en compétition avec la production alimentaire et permettent de stocker le CO₂ directement dans les sols, plutôt que de passer par la bioénergie.

Le principe est le suivant : les végétaux fixent le CO₂ lors de leur croissance, dont une partie est restituée aux sols sous forme de matière (litières de feuilles, pailles, résidus de culture, racines des arbres, litières racinaires...). Aujourd'hui, les sols contiennent environ deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère et pourraient en stocker plus.

Malgré un potentiel d'émissions négatives important, ce mode de stockage était le grand absent du rapport du Giec. Il présente pourtant l'avantage de ne pas détourner de surfaces de forêt ou de cultures, et contribue également à fertiliser les terres. L'initiative « 4 pour 1 000 » lancée par la France durant la COP21 en 2015 vise à augmenter les stocks de carbone des sols de 0,4 % par an et à créer un puits de CO₂ de l'ordre de 2,5 à 5 gigatonnes de CO₂ par an. À comparer avec le puits annuel de 0,4 à 11,3 gigatonnes de CO₂ avancés par le Giec pour la voie BECSC.

En octobre 2020, une équipe internationale réunie autour de Wulf Amelung, de l'université de Bonn, a montré que le stockage de CO₂ dans les sols permettrait de diminuer d'un tiers l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère.

Elle détaille les démarches à engager pour y parvenir, qui comprennent la mise en place d'un système d'information sur les sols car les actions à entreprendre dépendent étroitement de l'environnement local.

In fine, plutôt que de parier sur l'une ou l'autre des technologies à émissions négatives, il faudra trouver les combinaisons les plus adaptées aux conditions locales. C'est-à-dire agir au cas par cas, en fonction des potentiels de stockage des sols, de l'espace disponible pour faire des cultures énergétiques ou reboiser, mais aussi en fonction du climat, des possibilités de stockage géologique, de la demande locale en énergie, etc. L'important est de ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier, comme le soulignent Eric Toensmeier et Dennis Garrity dans l'article ci-contre.

BENOÎT GABRIELLE

professeur en physique de l'environnement, unité Ecosys, AgroParisTech/Inrae/université de Paris Saclay, à Thiverval-Grignon

ÉQUILIBRER L'OFFRE ET LA DEMANDE EN BIOMASSE

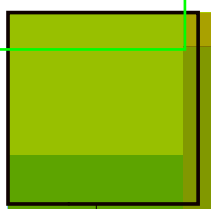
Les principaux projets visant à limiter le réchauffement climatique s'appuient sur la biomasse pour produire des carburants, de l'électricité, de la chaleur et divers produits chimiques et matériaux. En 2015, l'offre en biomasse, 3 154 millions de tonnes (Mt) produites (en vert), a répondu à la demande (2 749 Mt) (carré noir), dégageant un léger excédent. En 2050, l'offre en biomasse durable totale pourrait atteindre 5 150 Mt, tandis que la demande en biomasse va augmenter pour atteindre 3 386 Mt. À cela s'ajoute la demande pour de nouvelles applications comme les biocarburants celluliques et les bioplastiques (1 945 Mt).

Des mesures telles que le recyclage du papier et l'adoption de cuisinières « propres » pourraient réduire la demande de 2 382 Mt, de sorte que la demande s'élèverait finalement à 2 949 Mt ($3\,386 + 1\,945 - 2\,382 = 2\,949$, arrondis à 2 950 Mt). Ainsi, l'offre parviendrait à couvrir la demande en biomasse, malgré son augmentation élevée, seulement si la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECSC) n'est pas incluse. Cependant, les stratégies s'appuient fortement sur la BECSC. La production en 2050 (toujours évaluée à 5 150 Mt) pourrait répondre à un niveau faible de BECSC (2 100 Mt requises en plus), mais pas à un niveau élevé (4 900 Mt en plus).

2015

Offre en biomasse
(production totale)

3 154 millions de tonnes (Mt)



Demande en biomasse totale

2 749 Mt

Excédent :
405 Mt

Arbres, bambous et graminées
plantés sur des terres déboisées

Résidus de récoltes

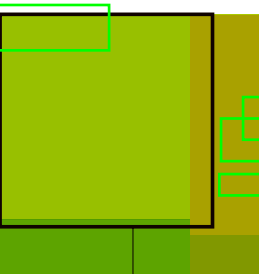
Forêts exploitées pour le bois

Arbustes fertilisants
sur des terres cultivées

2050 sans BECSC (projections)

Offre en biomasse

5 150 Mt



Demande en biomasse

3 386 Mt

Diminution de la demande
2 382 Mt

Augmentation de la demande
liée à de nouveaux usages
1 945 Mt

Biocarburants
de seconde
génération

Bioplastiques

Biochar

Chauffage urbain

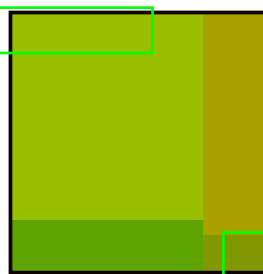
Biogaz

Demande ajustée
en biomasse

2 949 Mt

2050 avec BECSC (projections)

Niveau faible de BECSC
2 100 Mt en plus

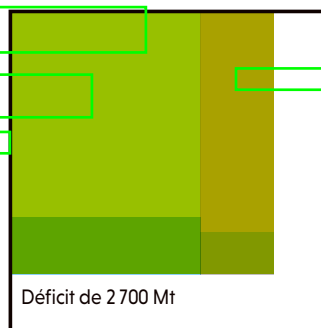


Demande
totale

5 050 Mt

Excédent de
100 Mt

Niveau élevé en BECSC
4 900 Mt en plus



Demande totale

7 850 Mt

Déficit de 2 700 Mt

> d'en consacrer encore la moitié environ pour la répandre dans les champs et reconstituer le sol. Finalement, un quart de ces résidus serait susceptible de constituer une source de biomasse supplémentaire.

Ces différentes approches pourraient réduire sensiblement la demande en biomasse, mais pas suffisamment pour influencer sur le

réchauffement climatique. Il est donc indispensable d'augmenter l'offre et de produire plus.

La deuxième étape consiste à produire davantage de biomasse sans augmenter l'empreinte écologique. Une approche largement promue consiste à planter des eucalyptus, des pins ou toute autre espèce capable de produire beaucoup plus de bois par hectare que les

forêts naturelles. Or la monoculture nuit à la biodiversité, à la qualité de l'eau et augmente les risques d'inondations. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la superficie mondiale des forêts plantées est déjà passée de 123 millions d'hectares en 1990 à 294 millions d'hectares aujourd'hui. Il semble difficile de l'accroître encore car, de nouveau, les terres disponibles sont très rares.

Les forêts naturelles renferment des réserves de carbone, notamment dans le bois. Ce carbone n'y demeure pas en permanence car les arbres morts, en se décomposant, en renvoient une partie dans l'air. Et ils en rejettent d'énormes quantités en brûlant lors des terribles incendies qui les ravagent. Cependant, les stocks de carbone dans le bois et le sol des forêts naturelles étant considérables, il est indispensable de protéger ces dernières.

L'une des techniques permettant de produire plus de biomasse est l'agroforesterie

Comment alors produire davantage de biomasse? Différentes techniques ont le vent en poupe. L'une d'elles consiste à transformer en éthanol, par la voie dite «cellulosique», des graminées comme l'herbe à éléphant (*Miscanthus*) et le millet vivace (ou *switchgrass*) ou des résidus agricoles ligneux. Les scientifiques ont mis au point des moyens efficaces pour décomposer ces fibres et transformer la cellulose en sucre, à l'aide de bactéries ou d'enzymes. Cette filière de l'éthanol cellulosique a un rendement énergétique supérieur à celle de l'éthanol fabriqué à partir de grains de maïs.

Une autre technique prisée est appelée «taillis à courte rotation» (TCR). Le principe est simple. On plante des arbres à croissance rapide, tels que des saules et des peupliers, en rangs très denses. De lourds engins y coupent les arbres tous les deux ou trois ans. Les TCR peuvent être implantés le long d'autoroutes, de voies ferrées ou dans des friches. Ils n'occupent à ce jour qu'environ 200 000 hectares à travers le monde, selon Project Drawdown, mais ils pourraient connaître une forte expansion tant le rendement est élevé.

Il existe également des techniques pour accroître la production de biomasse sans rogner sur les terres destinées à la production alimentaire, et en en augmentant même le rendement. Ainsi, l'agroforesterie consiste à intégrer des arbustes ou des arbres dans les champs. Par exemple, en France, des arbres destinés à la production de bois et des céréales d'hiver cohabitent sur les mêmes terres sans se faire trop de concurrence. Les arbres grandissent en été, tandis que les céréales, poussant à l'automne, ne sont pas gênées par leur feuillage. Les agriculteurs produisent sur 100 hectares ce qui nécessiterait 130 à 140 hectares si le bois et les céréales étaient cultivés séparément (ou 110 à 120 hectares dans des évaluations moins optimistes).

DES ARBRES DANS LES CHAMPS OU DANS LES PÂTURAGES

Arbres et arbustes peuvent également être cultivés dans les pâturages. Cette approche particulièrement prometteuse, nommée «sylvopastoralisme», se répand en Amérique latine. Des arbres à croissance rapide, dont le bois sera exploité, sont plantés en rangées suffisamment espacées pour y laisser de vastes zones de pâturage. Elles sont parsemées de bosquets d'arbustes, dont le bétail broute les feuilles. Le sylvopastoralisme fournit un fourrage de meilleure qualité, une ressource diversifiée et étalée dans le temps (herbe, feuillage, voire fruits) et des abris aux animaux, de sorte que la productivité du bétail (mesurée en tonnes de lait ou de viande par hectare) peut doubler. En outre, cette pratique augmente la quantité de carbone emmagasinée dans le sol.

Selon le même principe hydride, de petits exploitants de régions tropicales font cohabiter des cultures vivrières et des arbres destinés à la production d'énergie. Ils plantent directement dans leurs champs des arbres de l'espèce *Gliricidia sepium*, dont le feuillage fertilise le sol et fournit du fourrage au bétail. À la fin de la saison sèche, ils en récoltent le bois, qui leur sert de combustible domestique ou qu'ils vendent à une centrale de production d'électricité.

Cette approche permet d'augmenter la quantité de nourriture et d'énergie produites à partir de la biomasse et de stocker chaque année du carbone dans le sol et les racines. Elle permet également d'améliorer les revenus des populations rurales, voire de créer des emplois. Elle est déjà répandue au Sri Lanka, en cours de développement en Afrique et à ses débuts en Asie et en Amérique latine. Ce serait un moyen idéal de produire de la biomasse en vue de piéger du CO₂, au niveau des centrales électriques, et de le stocker si la technologie BECCS devenait disponible, sans pour autant sacrifier la production alimentaire.

> De façon générale, l'agroforesterie recèle un potentiel important et connaît une forte expansion. Le nombre d'arbres dans les exploitations agricoles a augmenté de 2% entre 2000 et 2010 et 43% des terres agricoles dans le monde ont une couverture arborée supérieure à 10%, la plupart dans les zones tropicales. Des millions de familles y ont adopté des techniques agroforestières, et d'autres s'engagent dans cette voie. Selon Global EverGreening Alliance, les arbres et arbustes fertilisant les sols pourraient, à eux seuls, produire 1200 millions de tonnes de biomasse d'ici à 2050. Cette ONG a lancé une campagne visant à piéger ainsi 20 gigatonnes de CO₂ atmosphérique par an d'ici à 2050 et les restituer à la terre. Pour atteindre cet objectif, elle concède qu'il faudra apporter un soutien soutenu aux agriculteurs.

En comparaison, l'agroforesterie aux États-Unis est en retard. À cela, nulle raison de nature biophysique: l'agroforesterie peut s'implanter avec succès dans les régions tempérées. Les quelques essais menés aux États-Unis se sont d'ailleurs avérés fructueux. La mécanisation de l'agriculture américaine ne constitue pas un obstacle non plus. Pour preuve, 9% des terres agricoles de l'Union européenne sont utilisées pour l'agroforesterie. La France et la Chine sont toutes deux parvenues à intégrer des arbres dans de grandes exploitations agricoles mécanisées.

Le retard américain provient plutôt d'un état d'esprit, d'une certaine réticence. Peut-être l'agroforesterie pourrait-elle commencer par s'implanter en bordure des champs avant de s'y frayer un chemin? Rappelons que, dans les années 1930, le centre des États-Unis (l'Oklahoma, le Kansas et le Texas) avait été ravagé par une sécheresse et de terribles tempêtes de poussière qui érodaient les sols. C'est notamment en plantant des arbres le long des champs que les fermiers étaient parvenus à briser les vents, freiner l'érosion des sols et, finalement, à restaurer l'agriculture.

Les grandes exploitations mécanisées des zones d'agriculture intensive comme la Corn Belt du Midwest américain (Iowa, Indiana, Illinois et Ohio, d'où provient 50% du maïs produit aux États-Unis) pourraient intégrer des graminées vivaces, comme l'herbe à éléphant et le millet vivace précédemment évoqués. Une fois récoltées, elles seraient transportées vers des bioraffineries qui produiraient des carburants ou de l'électricité. Il existe aujourd'hui des moyens d'aider les agriculteurs à identifier parmi leurs terres les zones peu propices aux cultures vivrières mais susceptibles d'être plus productives pour de telles graminées et qui, ainsi, pourraient être mieux exploitées.

La culture de certaines herbacées permet de fournir un produit appelé «extrait foliaire»,

un concentré de protéines (environ 50%), vitamines et minéraux. Bien qu'il soit une source alimentaire riche pour l'homme, on envisage plutôt d'en nourrir le bétail à la place du soja. Vivaces, piégeant le carbone dans le sol, les herbes adaptées à l'extraction foliaire présentent des rendements de production de protéines supérieurs au soja ou à toute autre culture vivrière.

UNE VOIE D'AVENIR

Il n'est ni possible ni souhaitable d'étendre la culture de biomasse sur des surfaces de la taille de l'Australie pour satisfaire la demande en BECSC ou en toute autre solution contre le réchauffement climatique. Des consommations et des productions de biomasse plus modestes pourraient réduire la quantité de CO₂ atmosphérique sans mettre en péril l'approvisionnement alimentaire ni les forêts. Mais cela ne suffira pas à guérir notre climat en surchauffe. Le Giec souligne qu'«une coopération entre les différents acteurs» et «des politiques coordonnées» sont nécessaires pour renforcer la sécurité alimentaire et maîtriser les changements d'usage des terres. Il reste indispensable d'engager rapidement des transformations de fond pour réduire à zéro les émissions de gaz à effet de serre. Elles passent notamment par la réduction de la consommation des pays et des individus riches, la conversion à l'énergie propre et l'électrification des transports et de l'industrie.

Peut-être pouvons-nous nous inspirer de populations locales qui misent sur la biomasse pour assurer leur avenir? Ainsi, la coopérative paysanne Las Cañadas, à Veracruz, au Mexique, a été créée pour mettre en œuvre un mode de vie durable. Ces dernières décennies, environ 70 à 90% de la forêt de cette région montagneuse a été convertie en pâturages. Le solaire et l'éolien n'y sont pas adaptés.

Alors, pour répondre à leurs besoins, la vingtaine de familles de la coopérative ont pris exemple sur des pratiques de production de biomasse qui ont fait leurs preuves dans le monde. Elles ont intégré des arbres et des arbustes dans leurs champs de maïs et leurs pâturages. Elles ont planté des bambous et des arbres à croissance rapide pour leur bois de chauffage, et même 50 000 arbres indigènes afin de reboiser leur territoire. Elles ont aussi adopté des systèmes de cuisson propres et économes en bois. Elles expérimentent actuellement une installation de gazéification du bois pour produire de l'électricité. Ricardo Romero, fondateur de la coopérative, estime qu'une famille peut satisfaire ses besoins annuels en combustible de cuisson à partir d'une parcelle d'environ... 26 mètres carrés. Nous avons sans doute à apprendre de la vision économe et agroécologique des familles de cette coopérative. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. Ametung et al., **Towards a global-scale soil climate mitigation strategy**, *Nature Communications*, vol. 11, article 5427, 2020.

Project Drawdown, **Drawdown Review 2020**, <https://drawdown.org>

C. Consoli, **Bioenergy and carbon capture and storage**, Global CCS Institute, 2019.

E. Toensmeier, **Vivre de permaculture et d'eau fraîche**, Imagine un Colibri, 2019.

cité

sciences
et industrie

la vie sur Mars: recherches avec *Perseverance*

jeudi 18 février 2021
— 18h30

Vivez en direct l'atterrissage
du rover en quête de vie
sur Mars

CONFÉRENCES

© Nasa/JPL - Caltech/MSSS/JHU-AP

accès gratuit
sur réservation obligatoire
cite-sciences.fr

En partenariat avec



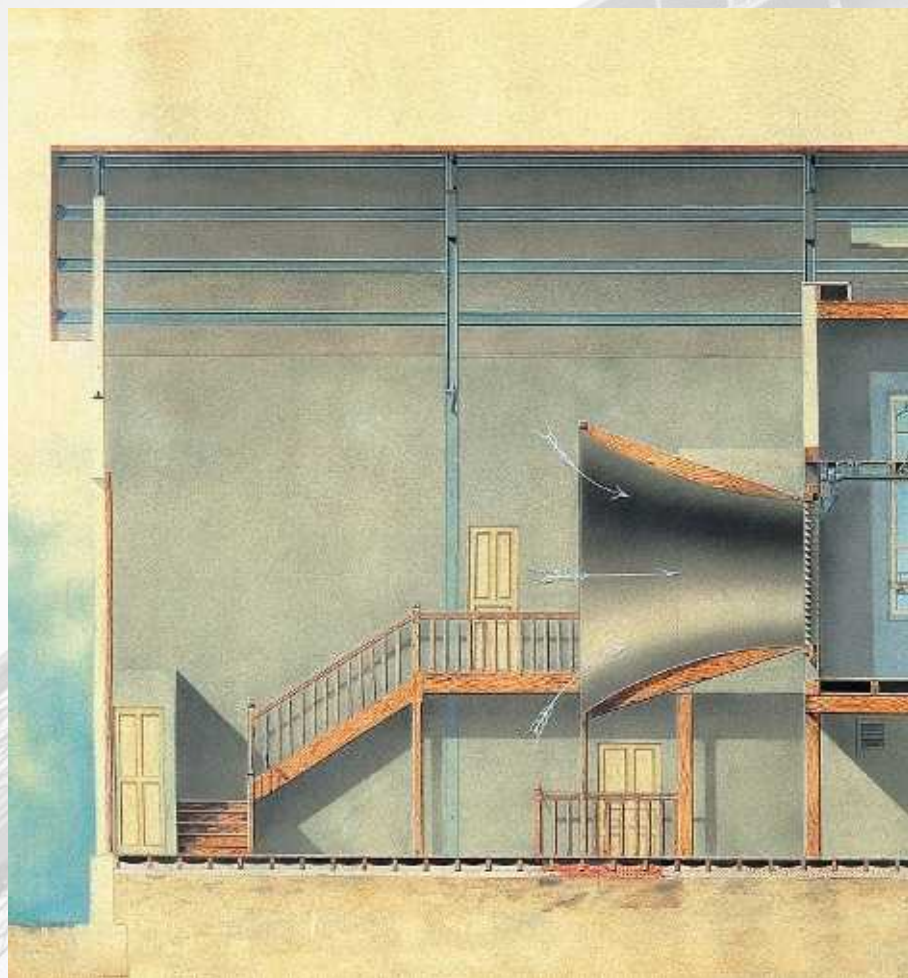
Avec le soutien de



La tour Eiffel, premier laboratoire d'aérodynamique en France

Dès l'aube du xx^e siècle, Gustave Eiffel profita de sa toute nouvelle tour pour étudier la chute libre et la résistance de l'air. Pour aller plus loin, il construisit une soufflerie sur place, puis à Auteuil, ce qui lui permit d'atteindre une vitesse de l'air jamais étudiée auparavant...

Depuis son inauguration, en 1889, la tour Eiffel a inspiré nombre de physiciens. Calcul de la forme de la tour en réaction au vent, utilisation de cette œuvre monumentale, la première de son type, pour des études météorologiques, premières réalisations de la TSF... les aspects scientifiques sous-jacents à l'œuvre du grand ingénieur que fut Gustave Eiffel sont si variés que les raisons ne manquent pas de s'y intéresser. Certaines recherches, cependant, sont moins connues. C'est le cas de celles sur l'aérodynamique qu'Eiffel a réalisées dans l'enceinte même de la tour. Pourtant, grâce à ses expériences, l'ingénieur a mis en évidence plusieurs phénomènes dont on poursuit encore aujourd'hui l'exploration.



L'ESSENTIEL

> Quelques années après l'inauguration de sa tour, Gustave Eiffel l'utilisa pour réaliser un ensemble de nouvelles expériences astucieuses d'aérodynamique.

> Il conçut notamment une soufflerie qui lui permit de mettre en évidence la forte réduction de la traînée d'une sphère dans un écoulement

à grande vitesse, liée au passage d'un état laminaire à un état turbulent aux abords de l'objet.

> Initialement mis en question par l'ingénieur allemand Ludwig Prandtl, ce phénomène, nommé « crise de traînée », fait toujours, un siècle plus tard, l'objet de recherches.

L'AUTEUR

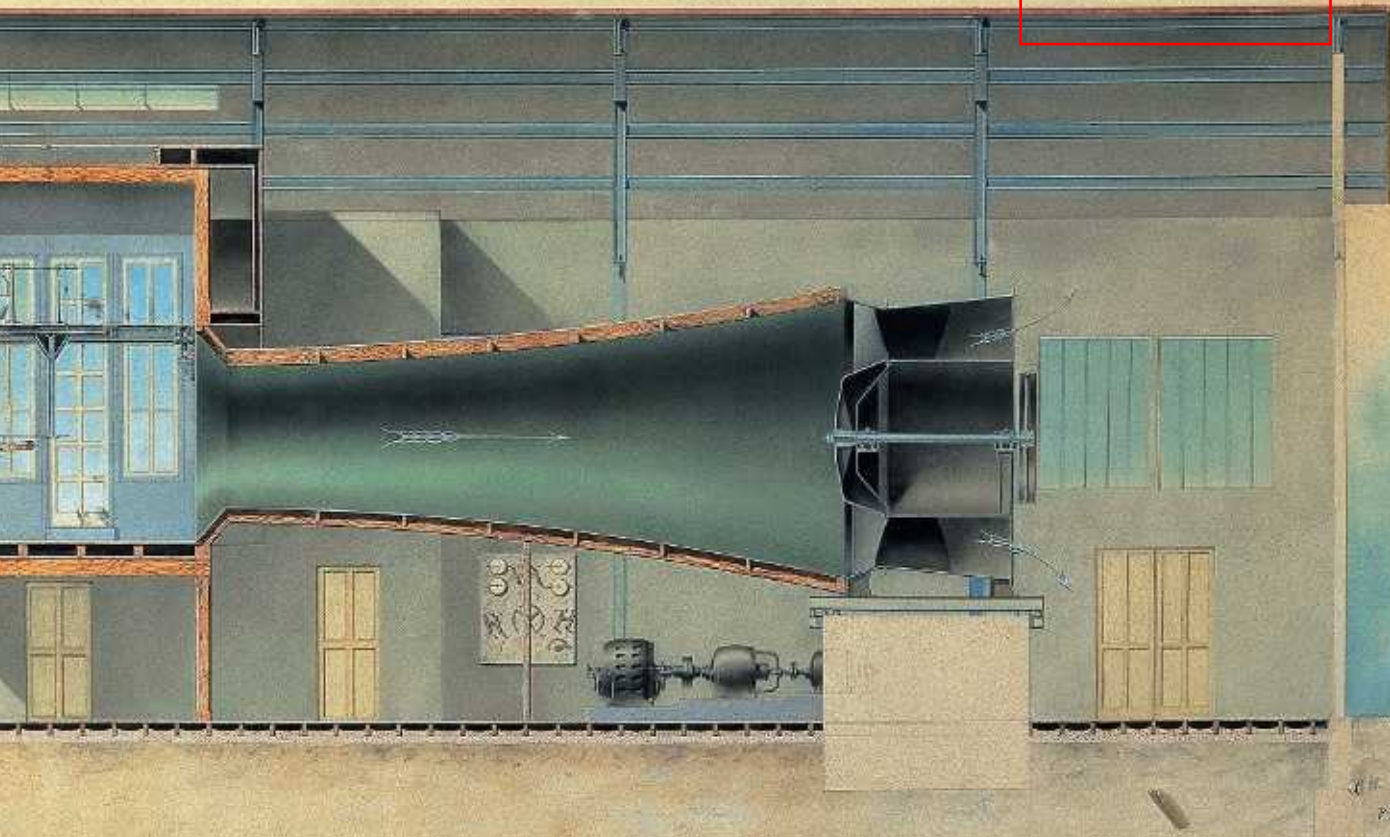


JOSÉ EDUARDO WESFREID
directeur de recherche
au CNRS dans le Laboratoire
de physique et mécanique
des milieux hétérogènes,
à l'ESPCI, à Paris

Article initialement paru
dans *Reflets de la physique* :
**J. E. Wesfreid, « La tour Eiffel :
le premier laboratoire
d'aérodynamique en France »**
n° 65, pp. 30-33, avril 2020.

Coupe longitudinale (Echelle 0^m05 par mètre)

La soufflerie d'Auteuil, que Gustave Eiffel fit construire en 1911 lorsque celle de la tour Eiffel fut détruite pour les besoins du quartier.



MESURER LA RÉSISTANCE DE L'AIR SUR LA TOUR EIFFEL

De 1903 à 1906, Gustave Eiffel mena toute une série d'expériences sur la tour Eiffel afin d'étudier la résistance de l'air « sur des surfaces de diverses formes, qui se déplacent en ligne droite avec des vitesses comprises entre 15 mètres et 40 mètres par

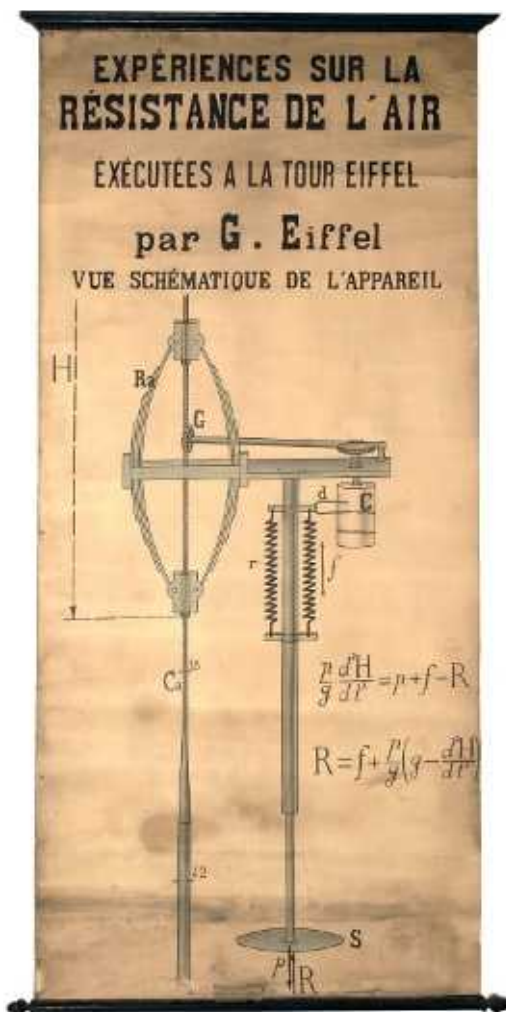
seconde », explique-t-il en 1907 dans son mémoire *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la tour Eiffel*. Il poursuit : « Ces recherches ont un intérêt pratique d'autant plus grand que des vitesses de

grandes vitesses qui intéressent le plus la stabilité des constructions et la résistance opposée par l'air aux véhicules rapides. »

Pour ce faire, il conçut un appareil de chute libre guidée (voir ci-dessous). Abandonné depuis le deuxième étage de la tour, un mobile glisse le long d'un câble vertical « et tombe à peu près comme en chute libre ». Sa vitesse, nulle au départ, à 115 mètres de hauteur, augmente constamment jusqu'à 40 mètres par seconde au point de freinage, réalisé en augmentant le diamètre du câble à 21 mètres du sol (à droite, deux personnes dégagent l'appareil de ce cône d'arrêt avant sa remontée). Le mobile pousse devant lui le corps à tester (une plaque placée en S sur le schéma à gauche), par l'intermédiaire de ressorts r . Lors de sa chute, le corps tend les ressorts. Un stylet attaché aux ressorts via un diapason (d) inscrit leurs mouvements sur un cylindre tournant C recouvert de noir de fumée, dont on déduit la force f de tension des ressorts. Grâce au principe fondamental de la dynamique, Gustave Eiffel, muni de f , du poids du mobile et de sa vitesse, déduit la résistance R de l'air.

La vitesse du mobile lâché en haut de la tour augmente jusqu'à 40 mètres par seconde

30 à 40 mètres sont difficilement réalisables et, en fait, n'ont pas encore été obtenues dans les recherches de ce genre. Les expérimentateurs ont surtout étudié les vitesses inférieures à 10 mètres. Ce sont cependant les



> Dès 1892, soit trois ans après l'inauguration de la tour, deux chercheurs, Louis-Pierre Cailletet et Eugène Colardeau, avec le soutien du physiologiste et inventeur Étienne-Jules Marey et de Gustave Eiffel, réalisent une série d'expériences consistant à laisser tomber du deuxième étage du monument (soit à 115,7 mètres du sol) des objets en chute libre, tenus par un fil fin et léger, en mesurant la vitesse par le déroulement du fil. En évaluant la résistance de l'air – égale au poids de l'objet en chute libre une fois atteinte sa vitesse limite –, ils obtiennent un coefficient de proportionnalité entre la vitesse au carré et la section du corps (en général carrée ou circulaire).

UN APPAREIL DE CHUTE LIBRE GUIDÉE

En 1893, Eiffel se retire de la vie professionnelle après sa participation malheureuse à la Compagnie du Canal de Panamá, secouée par de nombreux scandales politiques et financiers qui ont abouti à diverses poursuites pénales, lesquelles l'ont finalement innocenté. C'est alors qu'il décide de se consacrer à la recherche en s'intéressant au vent et à la météorologie. Il reprend en 1903 les expériences de chute des corps depuis la tour et conçoit un appareil plus astucieux permettant une mesure de la vitesse instantanée et de la force sur le corps.

Cet appareil est constitué par un lourd bâti, portant dans son extrémité les surfaces à tester et glissant le long d'un câble vertical de 115 mètres de hauteur (voir l'encadré page ci-contre). Le câble, à 21 mètres du sol, est augmenté dans son diamètre («cône d'arrêt») afin de freiner l'objet, permettant ainsi de mesurer la variation de la vitesse durant la décélération. Le temps écoulé est enregistré depuis le début de la chute, en même temps que la distance parcourue par l'appareil et la force sur l'objet d'essai. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un diapason et d'un cylindre tournant à une vitesse proportionnelle à celle du déplacement sur le câble, et sur lequel un stylet enregistre la force mesurée par les ressorts dynamométriques tenant l'objet.

La vitesse de chute U varie entre 15 et 40 mètres par seconde (vitesse maximale), ce qui permet à Eiffel de mesurer de façon précise le coefficient de résistance (défini comme le rapport entre la force de résistance par unité de surface normale au déplacement et la pression dynamique $\rho_{\text{air}} U^2/2$, où ρ_{air} est la masse volumique de l'air) et sa variation avec la vitesse sur des corps de différentes géométries (sphères, cônes, hémisphères, plaques et disques inclinés). En 1907, il publie ses résultats dans un long mémoire intitulé *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air*, ce qui lui assure une rapide communication internationale de ses résultats scientifiques. L'appareil de

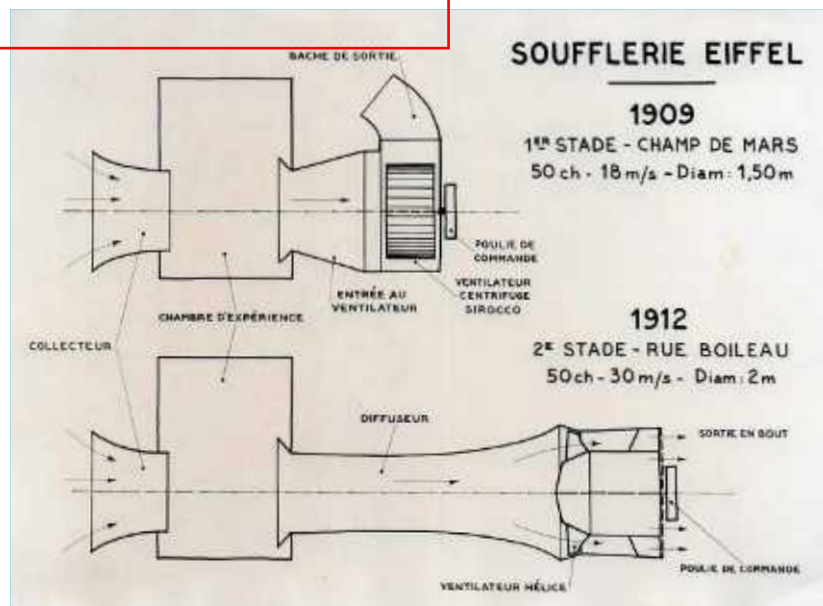
chute et la tour deviennent ainsi le premier laboratoire aérodynamique selon l'historienne des sciences Claudine Fontanon.

LA SOUFFLERIE EIFFEL

Ces recherches systématiques et précises encouragent Eiffel à aller plus loin. Poussé par les besoins technologiques de l'aviation naissante, il cherche à effectuer des expériences sur la résistance de l'air à grande vitesse dans des géométries plus accessibles que celle de la machine de chute.

Il construit, au Champ de Mars, dans une cabane au pied de la tour, une soufflerie ouverte («la méthode du tunnel») qui permet d'obtenir, dans une section carrée de 1,5 mètre de côté, une vitesse de l'air de 18 mètres par seconde. Ce courant est produit dans une chambre où l'air est aspiré grâce à un moteur de 50 chevaux (36,8 kilowatts) alimenté par les générateurs électriques de la tour, lesquels font de cette soufflerie la plus puissante du monde (voir la figure ci-dessous). Elle est équipée d'une

La vitesse de l'air dans la soufflerie du Champ de Mars atteint 18 mètres par seconde



Schémas des souffleries Eiffel au Champ de Mars (en haut) et rue Boileau (en bas). Le diffuseur est une innovation d'Eiffel qui permet d'améliorer le rendement énergétique des souffleries.

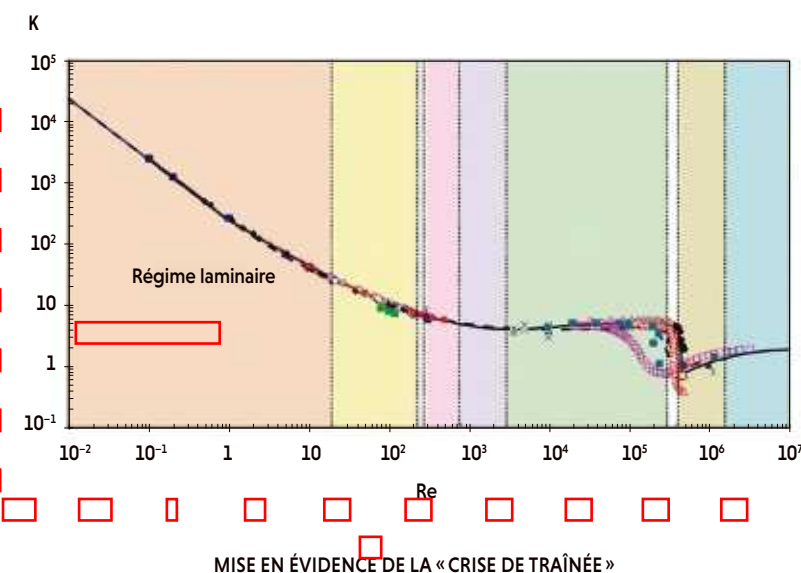
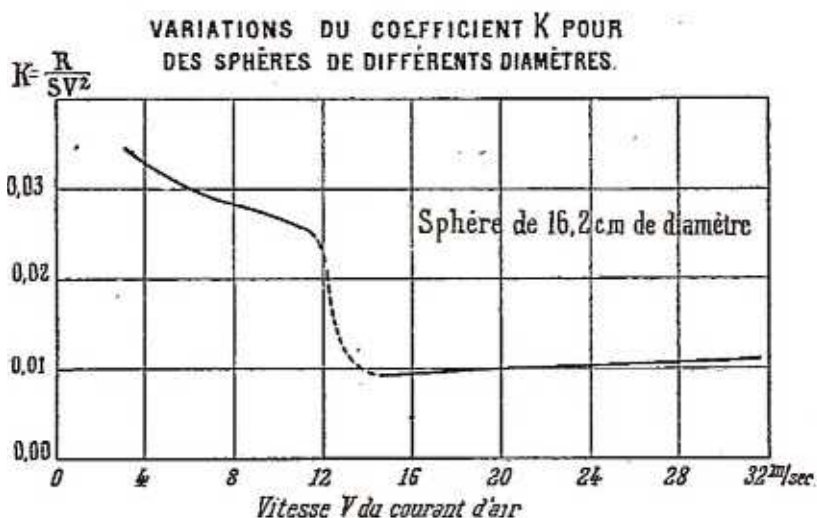
> balance aérodynamique imaginée par Eiffel, ainsi que d'un appareil destiné à la détermination des centres de poussée (la «girouette»), qui s'avérera très utile pour l'étude de la stabilité des ailes d'avion et en particulier pour observer comment, à partir d'une certaine inclinaison, apparaît un brusque déplacement du centre de pression de l'avant vers l'arrière.

Rapidement, de nombreux laboratoires aérodynamiques dans le monde ont adopté ce modèle de «soufflerie Eiffel». Un autre modèle très répandu et performant est celui de l'ingénieur allemand Ludwig Prandtl, qui construit en 1908 dans son laboratoire à Göttingen une soufflerie en circuit fermé.

Plus de 5000 essais seront réalisés dans cette installation du Champ de Mars, inaugurée en 1909, puis détruite en 1911 à cause des nuisances sonores et du renouvellement du quartier. À 79 ans, Gustave Eiffel reconstruit une soufflerie à Auteuil en élargissant sa veine d'essai à une section carrée de 2 mètres de côté, améliorant ainsi le rendement de l'installation grâce à la conception d'un diffuseur qui lui permet d'atteindre des vitesses de 30 mètres par seconde (voir les figures pages 75 et 77). Située au 67 rue Boileau, dans le XVI^e arrondissement de Paris, cette soufflerie est toujours opérationnelle et il est possible de la visiter. Classée monument historique, elle appartient actuellement au Centre scientifique et technique du bâtiment et abrite par ailleurs l'appareil de chute original.

LA « CRISE DE TRAÎNÉE »

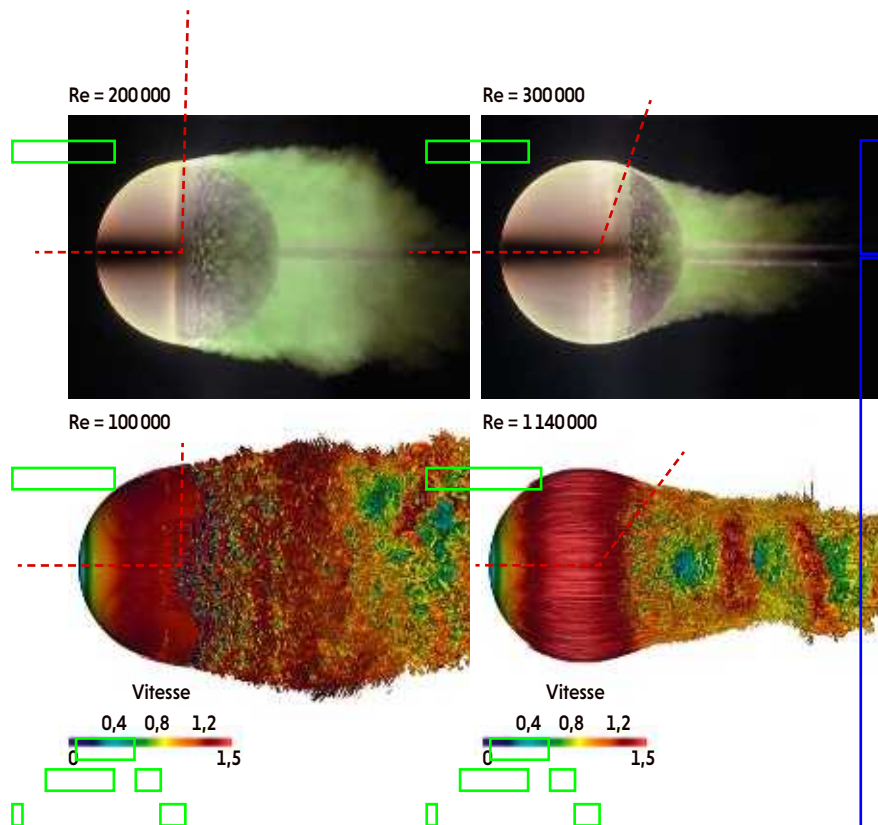
Parmi les milliers de résultats de mesures obtenus par Eiffel sur la résistance des objets dans l'air, quelques-uns méritent une attention particulière et motivèrent, en leur temps, une polémique. Il s'agit des expériences sur la résistance des sphères en mouvement à grande vitesse. En 1912, Otto Föppl, chercheur à Göttingen, suspecte dans une publication que les valeurs mesurées par Eiffel du coefficient de résistance des sphères sont entachées d'erreurs «manifestes», car les mesures effectuées



En 1912, dans sa toute nouvelle soufflerie d'Auteuil, Gustave Eiffel mesura le coefficient K de traînée d'une sphère de 16,2 centimètres de diamètre en fonction de la vitesse V du vent ($K = R / SV^2$, où R est la résistance totale et S la surface diamétrale). On note que le régime d'écoulement change pour une vitesse critique d'environ 12 mètres par seconde. Cette vitesse critique diminue quand le diamètre de la sphère augmente (en haut). Une compilation d'expériences similaires récentes montre de même l'existence de différents régimes en fonction du nombre de Reynolds Re (une vitesse adimensionnelle, en bas).

La crise de traînée se produit à grande vitesse, quand le régime devient turbulent

à Göttingen montrent des valeurs deux fois plus grandes. Eiffel répond la même année dans une note aux *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* que si, pour des vitesses inférieures à une certaine vitesse critique, les valeurs trouvées par lui-même correspondent bien à celles mesurées à Göttingen, pour des vitesses plus grandes, on trouve l'effet paradoxal que la traînée diminue de presque moitié (voir la figure ci-dessus), valeurs que l'on ne pouvait obtenir à Göttingen, où l'écoulement de la soufflerie était moins rapide qu'à Paris!



DEUX RÉGIMES D'ÉCOULEMENT AUTOUR D'UNE SPHÈRE

Dans un écoulement autour d'une sphère, la région de recirculation du fluide est beaucoup moins importante en régime turbulent (à droite) qu'en régime laminaire (à gauche), comme le montrent une expérience en tunnel hydrodynamique (en haut) et une simulation numérique des structures instables (en bas, les couleurs représentent la vitesse en unités de la vitesse d'entrée du fluide).

Eiffel venait ainsi de découvrir l'effet de la « crise de traînée », observée sur des corps en mouvement à partir d'une certaine valeur critique de la vitesse. En termes de vitesse adimensionnelle exprimée par le nombre de Reynolds Re ($Re = UL/\nu$, où U et L sont la vitesse et la taille caractéristiques du corps et ν est la viscosité cinématique du fluide), ce phénomène se manifeste quand Re est de l'ordre de 300 000 pour les sphères (ce qui équivaut à une vitesse de 20 mètres par seconde pour un ballon de foot).

Après la visite de Prandtl et de son confrère hongrois Theodore von Kármán à Auteuil en octobre 1913, Eiffel envoie les plans de son ventilateur hélicoïdal à Prandtl. Ce dernier modifie en conséquence sa soufflerie à Göttingen, ce qui lui permet d'augmenter la vitesse de 10 à 23 mètres par seconde, et ainsi de réaliser de nouvelles expériences qui confirment l'existence de la crise de traînée pour les sphères.

C'est Prandtl qui, de plus, explique la phénoménologie de la transition observée à partir du changement de nature de la « couche limite ». Ce terme, qu'il a introduit quelques années plus tôt, désigne la zone d'interface entre le corps et le fluide en mouvement loin

de lui. La crise de traînée se produit lorsque, au-delà d'une certaine vitesse critique du fluide par rapport au corps, l'écoulement dans cette couche devient turbulent.

Dans le régime sous-critique, la couche limite est laminaire. L'écoulement se décolle du corps à un angle au centre depuis le point de stagnation (le point le plus en amont du corps, où la vitesse du fluide est nulle) de près de 90° (voir la figure ci-contre). Dans le régime supercritique, l'angle de séparation augmente brusquement à près de 130° : le décollement se produit beaucoup plus loin du point de stagnation. Ce changement s'accompagne d'une diminution notable de la taille de la région de recirculation – la zone où le fluide se décolle du corps – et de la traînée. Une diminution déjà rapportée par Eiffel dans sa note de 1912 : « On peut se rendre compte de ces anomalies et constater qu'il existe bien deux régimes d'écoulement, en examinant la marche des filets autour de la sphère à l'aide d'un fil léger porté par une tige très mince. Au-dessous de la vitesse critique, il se forme à l'arrière un cône de dépressions, d'une longueur presque égale au diamètre de la sphère, et analogue à celui qui se produit à l'arrière des plaques frappées normalement par le vent. Au-dessus de cette vitesse critique, existe le nouveau régime pour lequel ce cône a disparu et se trouve remplacé par une région où l'air n'est relativement pas troublé. »

Dans le régime supercritique, on se trouve donc en présence d'une couche limite turbulente qui peut être excitée prématurément par des rugosités ou des perturbations d'amplitude finie, ce qui réduit la valeur du nombre de Reynolds critique. Ce phénomène de crise de traînée est observé sur d'autres corps, et en particulier sur un long cylindre normal à l'écoulement avec des caractéristiques très similaires, tout en conservant un caractère bidimensionnel en moyenne.

UN SUJET TOUJOURS OUVERT

Cette découverte, faite il y a déjà plus d'un siècle par Gustave Eiffel sur le Champ de Mars, demeure, encore aujourd'hui, un sujet ouvert de la dynamique des fluides. Quoique l'existence de la crise de la traînée soit bien établie, il reste à élucider sa dynamique intermittente et bistable en explorant, au-delà du comportement moyen, les aspects spatiaux sous-jacents : pourquoi, dans le régime supercritique, observe-t-on, de façon instable, des structures cohérentes ? Rares sont encore les simulations numériques capables de monter aux très hauts nombres de Reynolds nécessaires pour répondre à cette question. D'un point de vue expérimental, le contrôle des rugosités et des perturbations qui déclenchent la transition représente, de même, un défi à résoudre. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Eckert, Ludwig Prandtl : *A Life for Fluid Mechanics and Aeronautical Research*, Springer, 2019.

C. Fontanon, « La naissance de l'aérodynamique expérimentale et ses applications à l'aviation. Une nouvelle configuration socio-technique (1904-1921) », dans C. Fontanon (dir.), *Histoire de la mécanique appliquée*, pp. 57-88, ENS, 1998.

G. Eiffel, *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la Tour Eiffel*, L. Maretheux, 1907.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul

P.86 Art & science

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

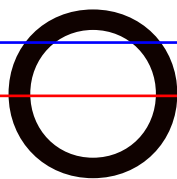
P.98 À picorer

LES PREMIERS SERONT-ILS LES DERNIERS?

Même lorsque les règles d'un jeu sont précises,
il est difficile de savoir quelle stratégie est la meilleure.
Illustration avec le dilemme du prisonnier.

LES AUTEURS

JEAN-PAUL DELAHAYE
et PHILIPPE MATHIEU
professeurs à l'université
de Lille, chercheurs
au laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



On sait bien que pour chaque type de scrutin, choix d'une décision, choix d'un élu, choix d'une liste d'élus, etc., il existe plusieurs systèmes de vote, chacun disposant de bons arguments pour prétendre être le plus naturel et donc celui qu'il faut préférer. Ces systèmes aboutissent parfois au même résultat final, mais on réussit en général assez facilement à construire des situations où les verdicts des différentes méthodes divergent: paradoxe de Condorcet, théorème de Kenneth Arrow (voir le livre de Michel Balinski et Rida Laraki dans la bibliographie). C'est insatisfaisant, car cela donne la possibilité d'arrangements et de manipulations pour faire gagner un camp ou un candidat en modifiant à temps les règles (voir l'encadré 1).

Pour les compétitions sportives, on utilise là encore une multitude de méthodes pour produire des classements entre joueurs ou équipes. Certaines compétitions, comme celle de la Coupe de France de football, ne peuvent pas envisager que chaque équipe rencontre chaque autre. Pour limiter le nombre de rencontres, le système introduit des tirages au sort. Ceux effectués lors du déroulement des épreuves de la Coupe de France ont pour conséquence que les équipes ne sont pas traitées également: les tirages font qu'une équipe peut avoir plus ou moins de chances d'aller loin, selon qu'elle doit affronter rapidement les meilleures équipes ou non.

Face à de tels problèmes, on peut quand même s'interroger sur l'existence de méthodes parfaites de classement. C'est ce que nous proposons de faire à propos du classement d'un

LE PARADOXE DES VOTES

1 Considérons une assemblée de 62 électeurs ayant le choix entre trois candidats A, B et C. Leurs ordres de préférence sont :

A > B > C pour 23 électeurs ;
B > C > A pour 17 électeurs ;
B > A > C pour 2 électeurs ;
C > A > B pour 10 électeurs ;
C > B > A pour 10 électeurs.

On en déduit que :

- 33 électeurs préfèrent A à B et 29 préfèrent B à A.
- 42 électeurs préfèrent B à C et 20 préfèrent C à B.
- 37 électeurs préfèrent C à A et 25 préfèrent A à C.

Cela conduit à un cycle de préférence A > B > C > A, qui interdit de conclure à un classement précis entre les trois candidats.

Une conséquence de cette situation est que, lors d'une élection

à un tour, le candidat A l'emporte avec 23 voix (A 23 ; B 19 ; C 20), alors que si l'on organise une élection à deux tours, comme l'élection présidentielle en France, les candidats A et C sont sélectionnés pour le second tour, que C remporte.

Il semble que, pour cet exemple, aucune réponse satisfaisante n'existe à la question : « Quel est le bon ordre entre A, B et C ? » Une situation de ce type se présente parfois pour le dilemme du prisonnier. C'est ce que montre le présent article.



ensemble de stratégies jouant au dilemme itéré du prisonnier. Nous n'envisagerons que des méthodes équitables, c'est-à-dire ne favorisant aucune équipe. Les systèmes que nous allons comparer seront stables: même si le hasard intervient, il ne modifie les classements que très rarement. La méthode de classement de la Coupe de France de football n'a pas cette propriété de stabilité, car il est assez probable qu'un second tournoi organisé la même année avec des tirages différents des rencontres conduirait à un autre classement final.

LE DILEMME DU PRISONNIER

Rappelons les règles du jeu. Deux individus jouent un dilemme du prisonnier si chacun doit choisir entre coopérer (c) et trahir (t). Ils sont récompensés par R points si chacun joue c, par P points si chacun joue t, et par, respectivement, T et S points si l'un joue t et l'autre c. On note: $[c, c] \rightarrow R+R$, $[t, t] \rightarrow P+P$, $[t, c] \rightarrow T+S$. La situation de jeu est celle d'un dilemme du prisonnier quand $T > R > P > S$ et $T+S \leq 2R$. Nous adopterons les valeurs de référence $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$.

Le nom «dilemme du prisonnier» provient d'un récit imaginaire. Deux individus armés sont arrêtés devant une banque. Un juge voudrait établir qu'ils étaient sur le point de mener une attaque. Il les interroge.

- Si l'un avoue, c'est-à-dire trahit son compère, et que l'autre poursuit la coopération avec son compère, situation notée $[t, c]$, celui qui avoue est libéré: rétribution de $T=5$ années de liberté. Celui qui n'a pas avoué va en prison 5 ans: rétribution nulle, $S=0$, il écope du maximum prévu pour une attaque de banque.

- Si les deux compères restent solidaires en n'avouant rien, $[c, c]$, ils vont 2 ans en prison chacun pour port illégal d'armes: rétribution de $R=3$ années de liberté par rapport aux 5 ans du pire cas.

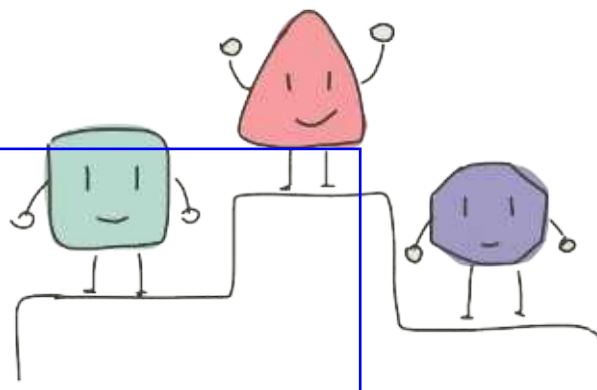
- Si les deux personnages avouent, $[t, t]$, ils font chacun 4 ans de prison: rétribution de 1 année de liberté par rapport au pire cas pour les remercier de leurs aveux, soit $P=1$.

Un comportement rationnel conduit à la trahison: elle produit toujours un meilleur résultat que la coopération. En effet, si l'individu A coopère, l'individu B gagne 5 points en jouant t et seulement 3 points en jouant c; si A trahit, B obtient 1 point en jouant t, et 0 en jouant c. Pour B, le choix t est ainsi toujours meilleur que le choix c. On parle de dilemme, car les deux >



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

2



SIX STRATÉGIES ET QUELQUES COMBATS

Au dilemme du prisonnier, deux stratégies se rencontrent, chacune gagnant des points selon les règles explicitées dans l'article et précisées ici sur un exemple:

- si les deux jouent c, chacune emporte 3 points: $[c, c] \rightarrow [3, 3]$
- si les deux jouent t, chacune remporte 1 point: $[t, t] \rightarrow [1, 1]$
- si A joue t et B joue c, alors A remporte 5 points et B aucun: $[t, c] \rightarrow [5, 0]$.

Lorsque le jeu est répété, le joueur adopte une stratégie qui indique comment il réagit au passé de la rencontre. Voici six stratégies possibles.

Gentille: je coopère quels que soient les coups passés.

Méchante: je trahis quels que soient les coups passés.

Donnant-donnant: je commence par coopérer, puis, au coup n, je joue ce que mon adversaire a joué au coup n-1. L'idée est d'inciter l'adversaire à coopérer en réagissant à chacune de ses trahisons. On montre que **Donnant-donnant** ne perd jamais plus de 5 points dans une rencontre quels qu'en soient la durée et l'adversaire, mais aussi qu'il ne fait jamais plus que son adversaire.

Méfiant: je commence par trahir, puis, au coup n, je joue ce que mon adversaire a joué au coup n-1.

Sondeur: je joue trahir-coopérer-coopérer pour les trois premiers coups, puis, si mon adversaire a coopéré aux coups 2 et 3, je trahis toujours, sinon je joue **Donnant-donnant**. L'idée est de tester les réactions de l'adversaire: s'il ne réagit

pas à la première trahison, je l'exploite au maximum, sinon je reste prudent.

Graduelle: je commence par coopérer, puis je coopère autant que c'est possible sauf si l'autre me trahit, auquel cas je réplique par une période de n trahisons successives, où n est le nombre de trahisons passées de mon adversaire, suivie de deux étapes de coopération. L'idée est d'être d'autant plus sévère que l'adversaire a souvent trahi, mais de tenter une réconciliation après chaque période de rétorsion en coopérant deux fois de suite pour calmer le jeu.

Voici quelques exemples de rencontre de durée 10.

1) **Donnant-donnant**

$0+3+0+3+0+3+0+3+0+3=25$
 c t c t c t c t c t
 t c t c t c t c t c

Méfiant

Chaque stratégie emporte 25 points à l'issue des 10 coups.

2) **Sondeur**

$5+0+3+3+3+3+3+3+3+3=29$
 t c c c c c c c c c
 c t c c c c c c c c
 $0+5+3+3+3+3+3+3+3+3=29$

Graduelle

Chaque stratégie recueille 29 points.

3) **Méchante**

$5+1+5+5+1+1+1+1+5+5=30$
 t t t t t t t t t t
 c t c c t t t t c c
 $0+1+0+0+1+1+1+1+0+0=5$

Graduelle

Ici, **Méchante** emporte 30 points, et **Graduelle** seulement 5.

Le tableau des points gagnés pour des parties de longueur 100 est:

	Sondeur	Graduelle	Donnant-donnant	Méfiant	Gentille	Méchante	Total
Sond.	104	299	299	295	496	98	1 591
Grad.	299	300	300	296	300	89	1 584
Donn.	299	300	300	250	300	99	1 548
Méf.	300	301	250	100	302	100	1 353
Gent.	6	300	300	297	300	0	1 203
Méchn.	108	144	104	100	500	100	1 056

> individus emportent 6 points en jouant [c, c], alors qu'ils en gagnent 5 en jouant [c, t] et 2 en jouant [t, t]. L'intérêt collectif est de jouer [c, c], mais une analyse rationnelle égoïste conduit à [t, t], qui est collectivement le pire cas! Dans ce jeu à «somme non nulle», ce que certains gagnent n'est pas nécessairement pris à d'autres et donc bien s'entendre est payant.

Le dilemme est «itéré» quand la situation se présente de façon répétée aux deux individus. Jouer consiste alors à choisir une stratégie déterminant, chaque joueur étant informé du passé, comment jouer le coup suivant. Six stratégies sont définies dans l'encadré 2.

Nous décrirons cinq méthodes équitables et stables de classification d'un ensemble de stratégies. La durée (nombre de coups) des rencontres pour nos calculs est toujours 100, mais dès que le nombre de coups dépasse une dizaine, les résultats changent très peu.

Nous verrons que les méthodes aboutissent parfois à des classements différents. Il est difficile d'analyser les divergences entre méthodes, qui sont pourtant reproductibles, car si l'on refait les évolutions probabilistes, chaque méthode produit en pratique toujours le même classement.

Précisons qu'aucune de ces méthodes ne permet de donner un classement absolu entre toutes les stratégies envisageables: quand on change l'ensemble des compétiteurs, une stratégie bonne peut devenir mauvaise et inversement. Le problème posé n'est pas de construire un ordre absolu entre toutes les stratégies imaginables, mais de déterminer si, un ensemble de compétiteurs étant fixé, les divers systèmes de classifications entre ces compétiteurs divergent sensiblement, et si oui pourquoi.

Dans la suite, on se donne un ensemble de stratégies $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ qu'on tente de classer par ordre de réussite quand elles jouent les unes avec les autres au dilemme du prisonnier.

Ce problème de la classification d'un ensemble de stratégies a été posé dès les premiers articles de Robert Axelrod et William Hamilton sur le sujet, en 1981. Dans son livre (*voir la bibliographie*), Robert Axelrod a lui-même largement pris la peine de comparer et analyser les différences entre les méthodes d'évaluation des gains que nous nommons M0 (nombres de parties gagnées), M1 (nombre de points gagnés), M2 (évolution déterministe).

Dans les recherches publiées sur le sujet, plusieurs autres méthodes ont été envisagées pour mener les classifications, mais le plus souvent les auteurs choisissent M1. Les méthodes M3 et M4 que nous décrivons sont des variantes probabilistes de M1 et M2; alors que nous pensions qu'elles devaient conduire à des classements identiques ou proches de ce que donnent M1 ou M2, nous avons découvert que les résultats sont plus compliqués et parfois étonnants.

M0: LE NOMBRE DE VICTOIRES

Notons M0 le tournoi des victoires. Son idée est simple: chaque paire s, s' de stratégies est considérée, elles jouent une partie l'une contre l'autre et celle qui emporte le plus de points gagne. Le score de chaque stratégie est compté de la manière suivante: +1 pour chaque partie gagnée, -1 pour chaque partie perdue et 0 en cas d'égalité. Avec les six stratégies données en exemple à l'encadré 2, on obtient, en s'aidant du tableau de points gagnés: *Méchante* 4, *Méfiant* 3, *Donnant-donnant* -1, *Sondeur* -1, *Graduelle* -2, *Gentille* -3. On notera donc:

M0: Méc > Méf > Don = Son > Gra > Gen.

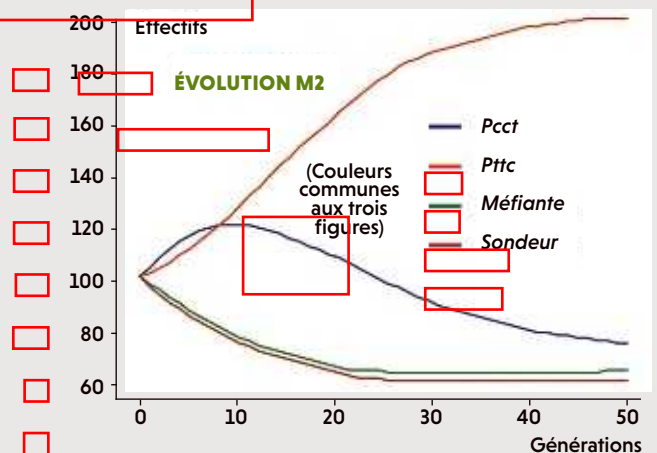
Le résultat n'est pas surprenant car *Méchante* ne perd aucune partie: à chaque fois qu'elle joue, elle obtient au moins autant de points que son adversaire, quoi qu'il joue. Ce nombre de victoires est cependant une piètre mesure de la qualité des stratégies, car pour

CLASSEMENTS RESSEMBLANTS, MAIS DIFFÉRENTS

Nous avons recherché un cas amenant au désaccord le plus extrême.

Aux stratégies *Méfiant* et *Sondeur*, nous avons associé *Pttc*, la stratégie qui joue périodiquement t, t, c, et *Pcct*, la stratégie qui joue périodiquement c, c, t. Les quatre stratégies ont toute la propriété de prendre l'initiative de trahir et c'est sans doute ce qui explique le désordre résultant. Les classements obtenus divergent sensiblement, même si l'on ne prend pas en compte M0. Aucun classement n'est meilleur que les autres.

M0 : Pttc = Méc > Son > Pcct
M1 : Pcct > Pttc > Méc > Son
M2 : Pttc > Pcct > Méc > Son
M3 : Méc > Son > Pcct > Pttc
M4 : Méc > Son > Pttc > Pcct



gagner souvent, il faut accepter d'emporter peu de points. Cela apparaît avec M1.

M1: LE TOURNOI DES POINTS GAGNÉS

Si l'on évalue la valeur d'une stratégie dans l'ensemble S des six stratégies au nombre de points qu'elle emporte quand elle rencontre chaque stratégie de S (y compris elle-même), on obtient un nouveau classement (voir le tableau des points gagnés dans l'encadré 2) :

M1: Son > Gra > Don > Méf > Gen > Méc.

Méchante est passée de première à dernière!

La divergence avec le classement M0 fondé sur les victoires est étonnante. Cela s'explique assez bien. Battre son adversaire en étant intransigeant est facile, mais a pour conséquence qu'on gagne peu de points si l'adversaire ne se laisse pas faire. *Méchante* bat tout le monde en n'acceptant aucune coopération et cela la condamne à récolter peu de points. *Sondeur*, plus subtile, ne cherche à exploiter que celles qui se laissent faire comme *Gentille*, ce qui la propulse en tête.

Les classements M0 et M1 sont bien sûr équitables: la méthode de classification ne favorise *a priori* aucune stratégie. Ces classements sont stables car déterministes: ils ne dépendent d'aucun paramètre aléatoire. Notons que si l'on considère que l'important est de réussir à coopérer avec les individus rencontrés et non de les écraser, le classement par victoires (M0) n'est pas pertinent, alors que celui par nombre de points gagnés (M1) est bien plus sensé. Cependant, M1 n'est pas l'idée ultime, car cette méthode ne prend pas en compte l'idée d'évolution par sélection naturelle.

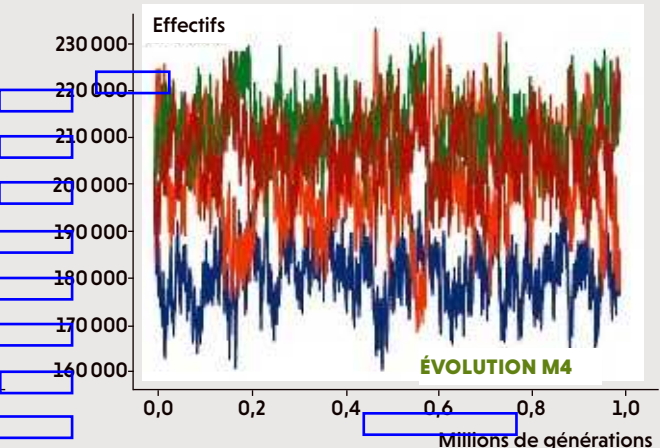
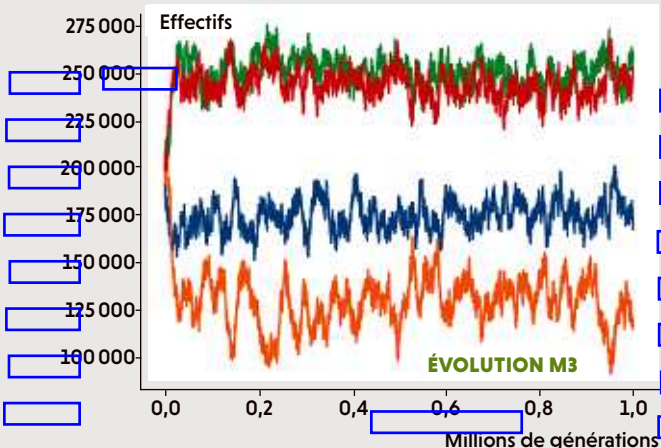
M2: COMPÉTITION ÉVOLUTIONNISTE DÉTERMINISTE

Les modèles évolutionnistes modélisent les compétitions entre stratégies en s'inspirant de ce qui se passe dans la nature quand des espèces

sont en compétition: celles qui réussissent à gagner beaucoup de points voient leurs effectifs augmenter, aux dépens de celles qui en gagnent peu, dont les effectifs diminuent.

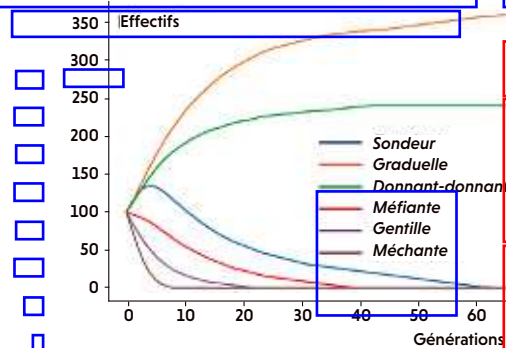
La troisième méthode, M2, a été proposée par Robert Axelrod. L'évolution des effectifs d'une population de stratégies à la génération $n+1$ dépend de sa réussite en nombre de points gagnés dans la «soupe» de la génération n . Au départ, une soupe d'individus comprend P_1 individus utilisant la stratégie s_1 , P_2 individus utilisant la stratégie s_2 , etc. Cette soupe est la génération 1. Chaque individu rencontre tous les autres individus de la soupe. L'effectif des individus jouant s_1 dans la composition de la génération 2 est proportionnel aux points que gagnent les s_1 dans la soupe de la génération 1. De même pour s_2 , et ainsi de suite. Les bonnes stratégies de la génération 1 ont de plus grandes descendance. On s'arrange (par une règle de trois) pour que le nombre total d'individus des générations successives reste constant. La génération 3 est calculée à partir de la génération 2 de la même façon, et ainsi de suite.

Ainsi, les stratégies qui réussissent à coopérer et gagnent donc beaucoup de points prospèrent, et celles qui jouent mal, par exemple parce que trop agressives, déclinent. Cependant, si une stratégie s réussit bien parce qu'elle exploite des stratégies s' qui jouent mal et qui disparaissent progressivement, alors au bout de quelques générations, s , n'ayant plus personne à exploiter, va jouer mal dans les nouvelles soupes et son effectif va alors diminuer. Être bon à ce jeu, c'est savoir exploiter les mauvaises stratégies, mais surtout bien jouer avec les bonnes stratégies. Le modèle est naturel, équitable et il est stable car déterministe. C'est le plus simple des modèles évolutionnistes et le plus souvent utilisé pour classer les stratégies au dilemme du prisonnier.



> Le classement issu de la courbe d'évolution des effectifs est:

M2: Gra > Don > Son > Méf > Gen > Méc.



L'effectif de *Sondeur* augmente au début (car il exploite *Gentille*) mais il diminue ensuite principalement parce que les *Gentille* disparaissent. Quatre des six stratégies sont exterminées, seules restent *Graduelle* et *Donnant-donnant*.

La victoire de *Graduelle* semble signifier qu'elle est plus robuste que *Donnant-donnant* et *Sondeur*, ce que d'autres simulations confirment. La mort des trois stratégies *Sondeur*, *Méfiante*, *Méchante* montre que, sauf en de très rares cas, ne survivent que les stratégies qui ne prennent pas l'initiative de trahir. Certes, *Gentille* ne prend pas l'initiative de trahir, mais

elle est vraiment trop gentille et se fait si violemment exploitée qu'elle est annihilée.

M3: L'ÉVOLUTION PAR RENCONTRES ALÉATOIRES

L'aspect déterministe de M2 est gênant, car dans le monde réel, un individu ne rencontre pas tous les autres, mais seulement certains plus ou moins au hasard. C'est l'idée du modèle M3 d'évolution par rencontres aléatoires.

À chaque pas de l'évolution, deux individus A et B jouant des stratégies différentes sont choisis au hasard dans la soupe. Ils se rencontrent et gagnent des points: G_A points pour l'un, G_B points pour l'autre. L'effectif des individus jouant la stratégie de A est augmenté de G_A , et l'effectif des individus jouant comme B est augmenté de G_B . Pour que le nombre total d'individus reste stable, on enlève alors $G_A + G_B$ individus dans la soupe en les choisissant au hasard. Ces simulations par rencontres aléatoires M3 modélisent l'idée d'une circulation au hasard des individus qui s'affrontent quand ils se croisent.

Comme dans le cas de M2, les effectifs évoluent. Pour que la variation des effectifs soit bien nette, il faut un très grand nombre de générations, car chaque génération ne modifie qu'assez peu les effectifs. Nos calculs ont été menés jusqu'à obtenir une forme de stabilité globale.

UN EXEMPLE DE BISTABILITÉ

4

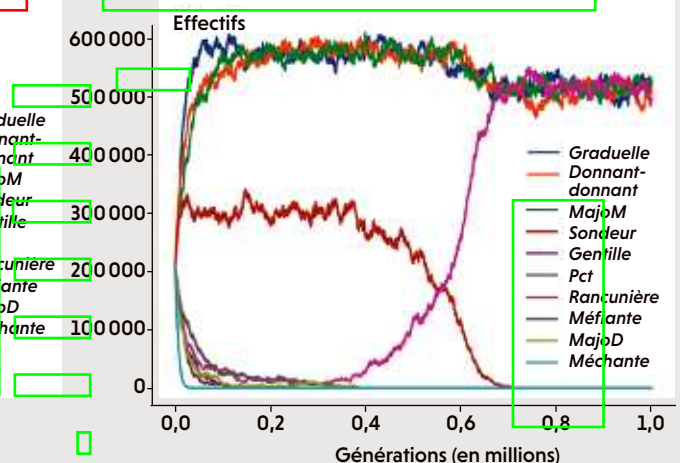
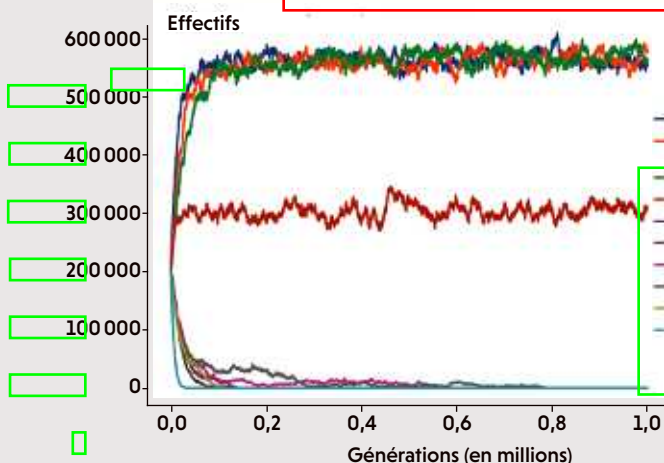
Nous sommes tombés sur un cas étrange et intéressant. On considère dix stratégies, les six stratégies de notre exemple de base, auxquelles on ajoute :

- *majoM* : je commence par c, et je joue ensuite ce que mon adversaire a joué en majorité. En cas d'égalité, je joue c.
- *majoD* : je commence par t, et je joue ensuite ce que mon adversaire a joué en majorité. En cas d'égalité, je joue t.
- *Pct* : je joue périodiquement c, t.
- *Rancunière* : je coopère toujours, mais, dès que mon adversaire a trahi, je trahis toujours.

Dans 60 % des cas environ, la simulation pour M4 (le classement par processus de Fermi) produit un classement identique, avec *Sondeur* disposant d'un effectif moyen à l'équilibre (graphique de gauche ci-dessous).

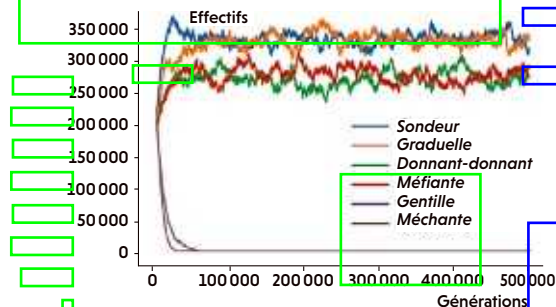
Dans 40 % des cas, la simulation pour M4 montre un croisement brusque où *Rancunière* monte rejoindre les meilleures en même temps que *Sondeur* s'effondre (graphique de droite).

L'évolution d'une telle soupe est comparable à un système bistable où, de façon imprévisible, le système bascule vers une configuration stable A ou vers une autre configuration stable B.



Dans cet exemple, après une période d'évolution caractérisée par de violentes hausses et baisses, les effectifs des stratégies sont stabilisés. *Sondeur* et *Graduelle* s'affrontent en tête sans qu'aucune ne s'impose. De même, *Donnant-donnant* et *Méfiant* se disputent indéfiniment la troisième place. *Gentille* et *Méchante* disparaissent au bout d'un certain temps. *Méfiant*, qui mourait dans la simulation M2, survit cette fois. *Sondeur* est revenue en tête avec *Graduelle*, qui confirme sa robustesse. Le classement M3 semble mélanger M1 et M2 :

M3: Gra = Son > Don = Méf > Gen = Méc.



L'idée, valable pour M2, que les stratégies qui prennent l'initiative de trahir se font éliminer n'est maintenant plus vraie. La raison en est sans doute que, avec M2, la situation tend presque toujours vers un état où tout le monde coopère avec tout le monde, et que cet état de «coopération généralisée» ne peut être atteint que si les stratégies qui prennent l'initiative de trahir disparaissent. On observe donc que le modèle d'évolution probabiliste M2 possède de nouvelles configurations d'équilibre laissant subsister les stratégies agressives. Le modèle M3 est plus conforme à la réalité sociale, où persistent des comportements agressifs et où la convergence vers un état de coopération généralisée n'est pas une règle absolue.

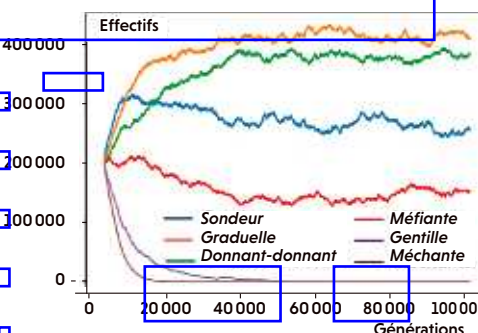
M4: LE CLASSEMENT PAR PROCESSUS DE FERMI

Le modèle M4 s'inspire de modèles de physique statistique rattachés à Enrico Fermi. À chaque pas de l'évolution, deux individus A et B sont choisis au hasard selon une probabilité proportionnelle à leur adaptation à la soupe, que l'on calcule en imaginant un tournoi généralisé entre toutes les stratégies de la soupe et en comptabilisant les points gagnés. Ils se rencontrent et gagnent des points: G_A points pour l'un, G_B points pour l'autre. L'effectif des individus jouant la stratégie de A est augmenté de G_A , et l'effectif des individus jouant comme B est augmenté de G_B . Comme pour M3, on retire $G_A + G_B$ individus de la soupe en les choisissant selon la probabilité uniforme.

Les simulations M4 modélisent un mécanisme de circulation aléatoire des individus qui s'affrontent quand ils se rencontrent, ce qui est

d'autant plus probable que leur aptitude est élevée. L'idée est que les meilleurs individus sont les plus actifs et cherchent plus fréquemment à affronter les autres éléments de la soupe. De nouveau, certaines stratégies agressives survivent.

M4: Gra > Don > Son > Méf > Gen = Méc.



Toutes les méthodes, sauf M0, donnent des classements différents, mais à part M0, ils se ressemblent. Cependant, même si les classements finaux sont proches pour M1, M2, M3, M4, la morphologie des courbes diffère sensiblement d'un modèle à l'autre.

La conclusion est qu'il n'existe pas d'ordre définitif entre les stratégies. On observe quand même que deux stratégies sont franchement mauvaises (*Gentille* et *Méchante*), que deux sont moyennes (*Méfiant* et *Sondeur*), et que deux sont en tête (*Donnant-donnant* et *Graduelle*). De plus, la stratégie *Graduelle* devance assez souvent *Donnant-donnant*.

Ce classement, déduit de la prise en considération de M1 à M4, est lié à l'ensemble des stratégies que nous avons étudiées, mais comme nous l'avons déjà mentionné, il reste propre à cet ensemble de stratégies.

Le plus souvent, les classements donnés par les simulations M1 à M4 sont similaires, ce qui est rassurant. Mais lorsqu'on compose une soupe avec beaucoup de stratégies agressives, c'est-à-dire prenant l'initiative de trahir, on est surpris. Le cas détaillé à l'encadré 3 est extrême et montre qu'aucune égalité n'est vérifiée dans le cas général. La situation est donc ici semblable à celle des systèmes de vote: le plus souvent, les méthodes donnent des classement identiques ou proches, mais fabriquer des exemples où les classements se contredisent est possible.

L'encadré 4 donne un exemple remarquable où la simulation M4 produit un système bistable. De façon totalement imprévisible, deux états statistiquement stables différents sont possibles, mais une fois tombé dans l'un ou l'autre, le système n'en sort plus.

Notons pour finir que mener de telles simulations, avec parfois plus d'un million de générations concernant des centaines de milliers de stratégies, n'est pas très facile et exige une programmation soignée... et beaucoup de patience! ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Mathieu et J.-P. Delahaye, **Experimental criteria to identify efficient probabilistic memory-one strategies for the iterated prisoner's dilemma**, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 97, 101946, 2019.

J.-P. Delahaye et P. Mathieu, **Adoucir son comportement ou le durcir**, *Pour la Science* n° 462, pp. 80-85, 2016.

P. Mathieu et J.-P. Delahaye, **New winning strategies for the iterated prisoner's dilemma**, *Proc. of the 2015 Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 1665-1666, 2015.

X. Liu et al., **Fixation probabilities in evolutionary games with the Moran and Fermi processes**, *Journal of Theoretical Biology*, vol 364, pp. 242-248, 2015.

M. Balinski et R. Laraki, **Majority Judgment: Measuring, Ranking, and Electing**, MIT Press, 2011.

R. Axelrod, **The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration**, Princeton University Press, 1997.

B. Beaufils et al., **Our meeting with gradual, a good strategy for the iterated prisoner's dilemma**, *Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, MIT Press, 1997.

R. Axelrod et W. D. Hamilton, **The evolution of cooperation**, *Science*, vol. 211, pp. 1390-1396, 1981.

L'AUTEUR



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

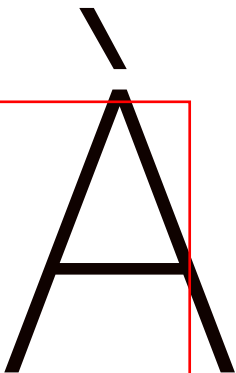
Exposition « Black Sun »,
du 5 février au 9 mai 2021,
au musée d'art
contemporain de Herning,
au Danemark :
www.heartmus.dk/en/

Le site de Søren Solkær :
<https://sorensolkær.com/>

Le livre *Black Sun* :
<http://bit.ly/Solk-BSUN>

LA MURMURATION DES ÉTOURNEAUX

Un photographe danois a saisi le ballet mouvant
et hypnotique des nuées d'étourneaux dont la modélisation
explique bien des phénomènes, notamment la migration
des gnous dans... «Le Roi Lion».



À l'aube, dans les marais du sud du Danemark, le paysage est paisible et immobile. Soudain, un bruit. D'un coup, ce qui apparaissait de loin comme les feuilles de quelques arbres réunis en un bosquet s'envole. Dans les airs, des milliers de points noirs composent alors une masse mouvante, liquide, adoptant

des formes variées qui convoquent l'imagination, là un oiseau géant, ici une raie, souvent de gigantesques vagues déferlantes... Parfois compact, parfois lâche, le nuage évolue en arabesques dignes d'une folle calligraphie. De quoi s'agit-il ? De simples nuées d'oiseaux, plus précisément d'étourneaux sarsonnets (*Sturnus vulgaris*).

C'est devant ce spectacle que le photographe danois Søren Solkær, revenu pour l'occasion sur les terres de son enfance, a posé son objectif et a donné corps à son projet *Black Sun*. L'ensemble des clichés ont été réunis en un livre et certains, tirés sur un papier japonais traditionnel (le *washi*, à base de fibres de mûrier sauvage), seront exposés pendant quelques mois au musée d'art contemporain de Herning, au Danemark.

Que sait-on de la dynamique de ces nuées d'étourneaux, pour lesquelles on parle aussi de *murmuration* ? Ces oiseaux sont très sociaux, excepté au moment de la reproduction, et se réunissent notamment avant de migrer, ce comportement concernant surtout les populations du nord et de l'est de l'Europe. Des communautés rassemblant jusqu'à des millions d'individus se préparent ainsi à parcourir des milliers de kilomètres vers le sud du continent, voire l'Afrique du Nord.

Plusieurs mathématiciens et physiciens se sont penchés sur les mécanismes à l'œuvre au cœur d'un nuage d'étourneaux. Au début des années 1980, Wayne Potts, aujourd'hui professeur à l'université de l'Utah, à Salt Lake City, aux États-Unis, montre à partir d'enregistrements vidéo qu'il n'y a pas de chef : n'importe





Une nuée d'étourneaux, photographiée par Søren Solkær.

quel membre du groupe peut commencer un déplacement qui se propage ensuite à ses voisins à la façon d'une onde. Ce comportement est comparable à celui d'une ola dans les tribunes d'un stade.

En 1995, Tamás Vicsek, de l'université Eötvös-Loránd, à Budapest, est parvenu à modéliser ce mouvement collectif. Seuls deux paramètres suffisent à en rendre compte. D'abord, un étourneau a tendance à aligner son déplacement et sa vitesse avec ceux de ses voisins les plus proches. Ensuite, un oiseau a une propension à se rapprocher de ces mêmes voisins tout en maintenant une distance minimale. Ces deux éléments – l'alignement et la cohésion – sont quantifiables, et en faisant varier leurs valeurs on peut simuler et étudier de nombreux types de mouvements collectifs, pas seulement

celui des étourneaux. À l'aide de ce modèle, Hugues Chaté, du CEA à Gif-sur-Yvette, et Guillaume Grégoire, de l'université de Paris, ont ainsi reproduit le déplacement de bactéries dans un film liquide, le comportement d'un banc de poissons, et même un phénomène de ségrégation cellulaire qui a lieu par exemple lors de la régénération d'une hydre d'eau douce.

Étonnamment, les informaticiens des studios d'animation avaient déjà obtenu de façon empirique ce modèle: il est à la base des scènes de foules, comme la migration des gnous dans *Le Roi Lion*, de Disney, sorti en... 1994.

La nuée a-t-elle une utilité pour les étourneaux? Il semble que oui, car en présentant une masse plus ou moins compacte, ils décourageraient les prédateurs,

comme les faucons, qui hésiteraient à se risquer dans un nuage dense, où le risque de blessure est important. Mais malheur aux oiseaux restés à l'écart!

Mieux vaut pour eux suivre ce qu'avait dès 1869 décrit Isidore Ducasse, comte de Lautréamont, dans *Les Chants de Maldoror*: «C'est à la voix de l'instinct que les étourneaux obéissent, et leur instinct les porte à se rapprocher toujours du centre du peloton, tandis que la rapidité de leur vol les emporte sans cesse au-delà.» Au-delà, vers l'objectif de Søren Solkær, tendu vers ce qu'il nomme un «fragment d'éternité». ■

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



LES AUTEURS



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

LA BOUGIE DE LAVOISIER

Depuis des siècles, une expérience de «physique amusante» suscite régulièrement des interprétations variées. Pourtant, il y a 250 ans, Antoine Lavoisier avait donné la bonne explication.



Posez une bougie allumée sur une jatte dont le fond est rempli d'eau. Recouvrez-la avec un grand récipient en verre jusqu'à ce que le bord de ce dernier trempe bien dans l'eau. Après quelques secondes, la flamme de la bougie s'affaiblit puis s'éteint, tandis que l'eau est aspirée dans le récipient et remonte jusqu'à le remplir environ au cinquième de son volume (si l'eau est assez abondante).

Plusieurs pistes sont généralement invoquées pour expliquer ce phénomène : disparition du dioxygène de l'air en raison de la combustion (une «explication» très répandue), dissolution du dioxyde de carbone produit, ou encore diminution du volume de l'air chaud,

etc. De récentes et soigneuses expériences confirment l'interprétation du chimiste français Antoine Lavoisier et écartent les autres : lorsqu'on recouvre la bougie avec le récipient, de l'air chaud se trouve emprisonné ; en se refroidissant une fois que la bougie est éteinte, cet air se contracte, ce qui provoque la montée de l'eau.

LE THERMOSCOPE, UNE EXPÉRIENCE MILLÉNAIRE

Reprenons l'histoire à son commencement, il y a plus de 2 000 ans. Les premières traces écrites de cette expérience datent en effet de 300 avant notre ère. Le scientifique et ingénieur Philon de Byzance l'a décrite dans ses *Pneumatica*, et expliquait la réduction du volume

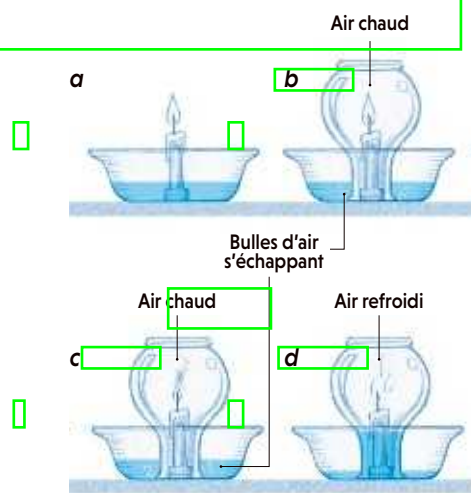
d'air présent en invoquant la théorie des quatre éléments (air, eau, feu, terre). Pourtant, Philon avait compris que la dilatation et la contraction thermiques de l'air se manifestaient dans le «thermoscope», un appareil présentant le même effet.

Cet instrument, dans sa version popularisée par Galilée, consiste en un petit flacon de la taille d'un œuf de poule, muni d'un col très long et fin comme une paille. L'expérimentateur chauffe ce flacon et l'air qu'il contient en saisissant le récipient entre ses mains ; puis il le renverse et plonge l'ouverture dans de l'eau. Quand il enlève ses mains et que le flacon et l'air qu'il contient refroidissent, l'eau monte rapidement dans le col. Ce phénomène



DILATATION PUIS CONTRACTION DE L'AIR

Lorsque la bougie brûle, l'air qui l'environne s'échauffe, donc se dilate. À moins de réaliser l'expérience avec soin, en plongeant le récipient renversé dans une profondeur d'eau suffisante, des bulles d'air s'échappent alors (b, c). La quantité d'air présente dans le récipient renversé se voit alors réduite, et lorsque cet air se refroidit après l'extinction de la flamme, son volume diminue (d). C'est ce qui fait monter l'eau.



Dans l'expérience de la bougie comme dans celle du «thermoscope» (à gauche), c'est la contraction de l'air, lors de son refroidissement, qui explique la montée de l'eau.

s'explique aujourd'hui aisément, sachant qu'une variation de 3 °C de la température d'un gaz provoque une variation de volume d'environ 1% (aux alentours de la température ambiante).

Quant à l'expérience de la bougie, la bonne interprétation est venue avec le «Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique et dans l'air éminemment respirable», d'Antoine Lavoisier. En deux phrases lumineuses, tout est dit: «Presque tous ceux qui se sont occupés d'expériences sur la combustion des chandelles ou bougies se sont persuadés qu'il se faisait une diminution considérable du volume de l'air pendant la combustion. [...] Mais on n'a pas fait attention qu'on ne peut placer un récipient sur une bougie sans que l'air

du récipient soit échauffé dans l'instant même où on le place sur la bougie, et avant qu'on l'ait appliqué sur la platine; c'est donc de l'air chaud qu'on enferme sous la cloche: or de l'air chaud diminue de volume en se refroidissant.»

ÉCHAPPÉE DE BULLES D'AIR

Lavoisier a aussi constaté que, suite à son échauffement par la flamme de la bougie, le volume de l'air sous la cloche augmente avant de diminuer. Si l'on se contente de poser sans précaution un récipient au-dessus d'une bougie enflammée posée dans une soucoupe par exemple, cette augmentation de volume force l'air à s'échapper en faisant des bulles que l'on observerait si l'on y prêtait plus attention.

Conclusion: quand on réalise l'expérience sur un coin de table, on ne contrôle pas vraiment la quantité d'air dans le récipient ni sa température. Pour garantir que l'air ne s'échappe pas, il suffit de réaliser l'expérience dans un récipient profond rempli avec plusieurs centimètres d'eau, de telle sorte que lorsqu'on renverse complètement la cloche dans l'eau, elle soit immergée dans une hauteur d'eau suffisante. Et pour s'assurer que l'air enfermé sous la cloche soit à température ambiante, il faut que le volume d'air soit clos avant d'allumer la mèche de la bougie!

C'est ce qu'a réalisé Joseph Priestley, le concurrent de Lavoisier, en enfermant sous la cloche plongée dans du mercure une bougie non allumée puis en >

> enflammant la mèche avec les rayons du soleil concentrés par une lentille.

Lavoisier réalisera une variante dans laquelle il placera du phosphore à côté de la mèche et qu'il allumera à l'aide d'un fer chaud amené à travers le mercure.

Dans une version plus moderne de l'expérience, rapportée en 2011, Francisco Vera et deux collègues, de l'université catholique de Valparaíso, ont allumé la mèche en faisant passer un courant électrique (voir l'encadré ci-contre). La conclusion est sans appel : dans ces conditions, le volume d'air varie de moins de 1% entre le début et la fin de l'expérience, comme s'il ne s'était rien passé pour l'air, sinon s'échauffer et se dilater avant de retrouver la température ambiante et son volume initial.

LA CHIMIE TROUBLE LE JEU

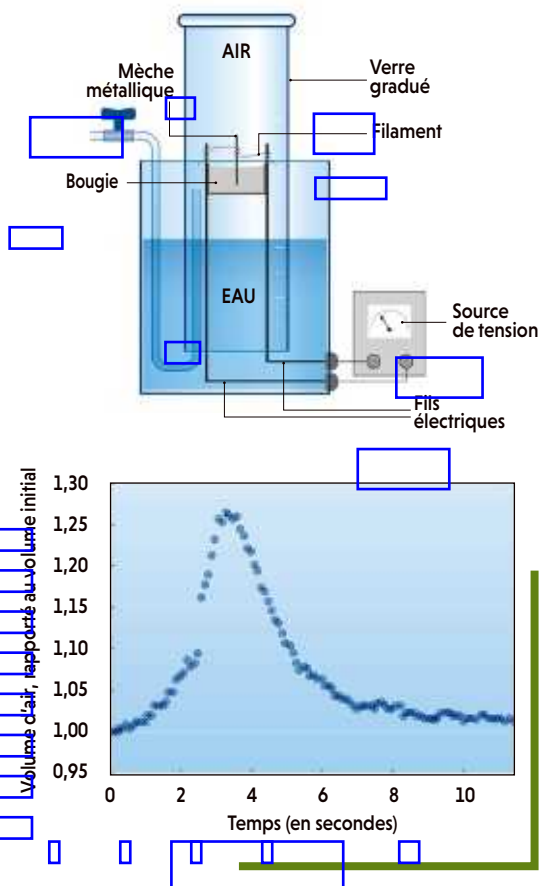
Cela a de quoi nous désorienter, car il y a bien une réaction chimique : la combustion de la paraffine de la bougie, vaporisée par la chaleur et réagissant avec le dioxygène de l'air. Cette réaction s'écrit : $C_{25}H_{52} + 38 O_2 \rightarrow 25 CO_2 + 26 H_2O$, ce qui signifie que pour 38 molécules de dioxygène consommées, on produit 25 molécules de gaz carbonique et 26 molécules d'eau. Or le dioxygène constitue, en volume, 21% de l'air atmosphérique : s'il était entièrement consommé lors de la combustion de la flamme, ce que suggère d'ailleurs l'extinction de la bougie, nous obtiendrions, par proportionnalité, 13,8% ($21 \times 25 / 38$) du volume initial sous forme de gaz carbonique et 14,4% sous forme de vapeur d'eau. On peut considérer que toute la vapeur d'eau se condense, mais qu'advient-il du dioxyde de carbone ? Des expériences complémentaires montrent que sa dissolution dans l'eau est négligeable, et il devrait donc y avoir, finalement, une réduction de 7% du volume total. Pourquoi n'est-ce pas le cas ?

Nous avons supposé que la réaction était complète. Or, lorsque la flamme s'éteint, seulement 60% de l'oxygène a été en réalité consommé. Ainsi, lors d'une expérience quantitative réalisée avec une feuille de papier, la masse de celle-ci a été choisie pour que sa combustion complète nécessite exactement la quantité d'oxygène présente sous la cloche. Cette feuille n'a brûlé qu'à moitié.

Pourquoi cette combustion incomplète ? Au fur et à mesure de la combustion, la quantité d'oxygène présente diminue : la réaction ralentit donc et, avec elle, la chaleur produite. Vient un moment où la température de la flamme et la quantité

UNE EXPÉRIENCE PROBANTE

Dans l'expérience réalisée par Francisco Vera et ses collègues, le récipient cylindrique est renversé et plongé dans une profondeur suffisante pour empêcher l'air de s'échapper (préalablement, le robinet du petit tube est ouvert, ce qui permet à l'eau de rentrer partiellement dans le récipient ; il est ensuite fermé). La mèche de la bougie est constituée d'un très fin tube d'acier inoxydable, et est allumée en faisant passer un courant électrique dans un filament métallique. Ainsi, le volume d'air reste clos pendant toute l'expérience. Dans ces conditions, on constate que ce volume commence par augmenter (en raison de l'échauffement de l'air), puis diminue (en raison du refroidissement) jusqu'à retrouver quasiment sa valeur initiale.



d'oxygène présente localement ne suffisent plus pour entretenir la réaction, qui s'arrête d'elle-même. C'est ce que l'on observe avec la bougie.

Dans les premières secondes, la flamme est très lumineuse et la combustion est totale, puis cette luminosité diminue et l'on voit de la fumée noire s'élever : la réaction est incomplète, elle produit du carbone sous forme de suie, et aussi du monoxyde de carbone. Enfin, la flamme s'éteint et un peu de paraffine continue à s'évaporer de la mèche chaude. Cette consommation d'une partie seulement de l'oxygène et la production de monoxyde de carbone (qui ne nécessite qu'un atome d'oxygène au lieu de deux) expliquent pourquoi la réduction observée du volume est très inférieure aux 7% prévus pour une combustion totale... Mais quand on effectue sans précaution l'expérience, l'effet thermique s'impose : une variation moyenne de température de 60 °C de l'air suffit pour provoquer la variation observée de un cinquième de son volume. ■

Les auteurs ont notamment publié :

En avant la physique !, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

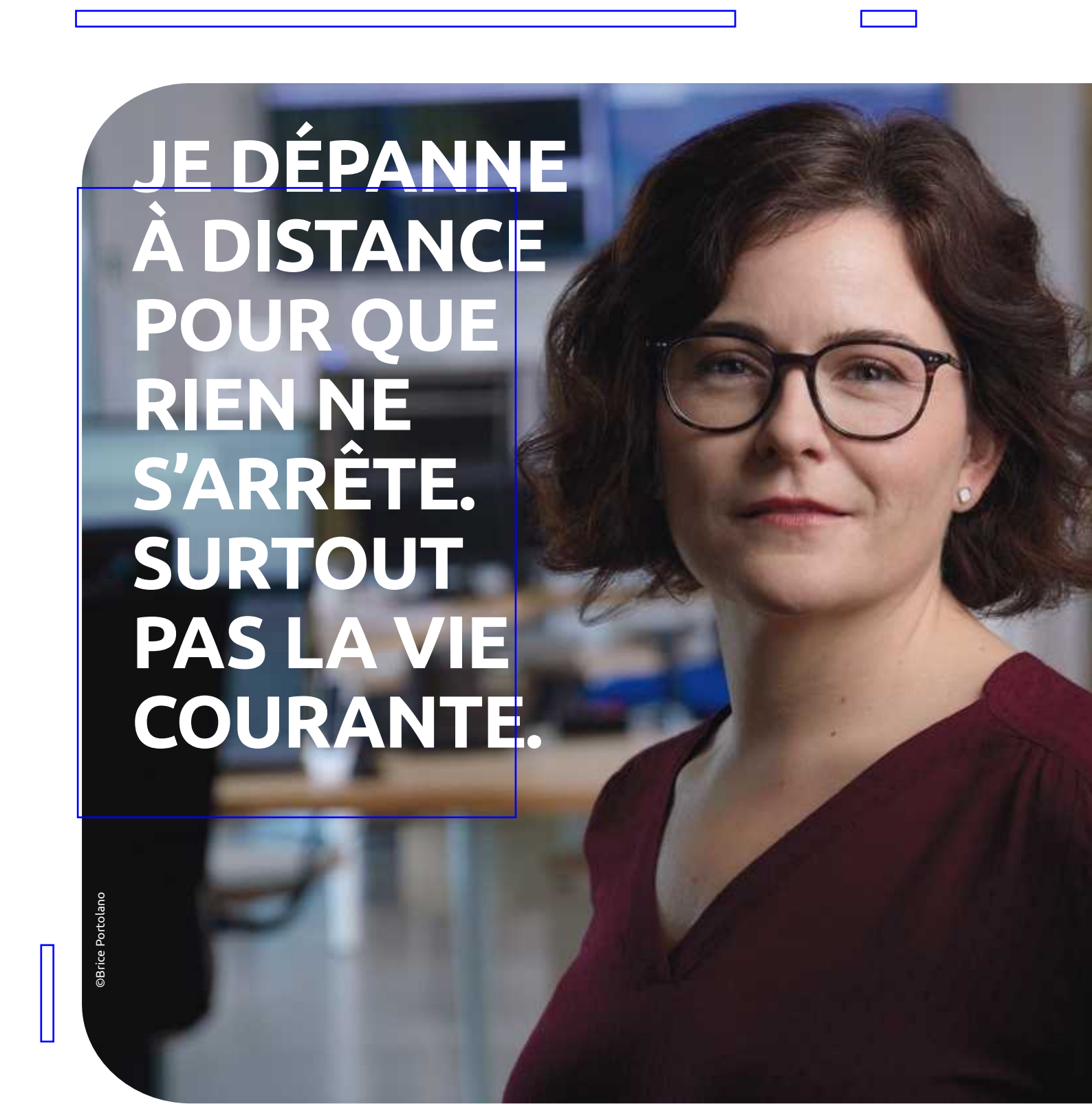
BIBLIOGRAPHIE

F. Vera et al., **Burning a candle in a vessel, a simple experiment with a long history**, *Science & Education*, vol. 20(9), pp. 881-893, 2011.

E. Vitz, **Paradoxes, puzzles, and pitfalls of incomplete combustion demonstrations**, *Journal of Chemical Education*, vol. 77(8), p. 1011, 2000.

A. Lavoisier, **Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique, et dans l'air éminemment respirable**, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1777, p. 195.

Vidéo sur Mercator la Physique : <https://youtu.be/bB9Om7ct2Q>



JE DÉPANNE
À DISTANCE
POUR QUE
RIEN NE
S'ARRÊTE.
SURTOUT
PAS LA VIE
COURANTE.

©Brice Portolano

Émilie est Agent de Conduite Réseau à Ormes (45).

Émilie pilote en temps réel le réseau électrique pour en garantir la fiabilité. Avec Émilie, Enedis sécurise l'exploitation d'un réseau électrique toujours plus agile et connecté. **C'est ça, le service public de la transition écologique dans les territoires.**

Retrouvez-nous sur www.enedis.fr

ENEDIS
L'ÉLECTRICITÉ EN RÉSEAU

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

L'AUTEUR



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

POURQUOI LES MOLLUSQUES SONT MODULAIRES

Qu'ont en commun un coquillage, un chiton et une pieuvre?

Ce sont des mollusques, construits avec les mêmes modules: un pied, un manteau, une tête, des viscères. Leur étonnante diversité serait due à une poignée de gènes particulièrement versatiles...

Les mollusques regroupent des animaux *a priori* très différents. Parmi les huit classes de cet embranchement, certaines sont bien connues, comme celles des bivalves (moules, huîtres, palourdes...), des gastéropodes (ormeaux, bigorneaux, escargots...) ou des céphalopodes (nautiles, calmars, pieuvres...). D'autres le sont un peu moins, comme les scaphopodes ou dentales, des animaux marins fouisseurs à coquille tubulaire arquée, ou les monoplacophores, dont le plus connu est le patelliforme *Neopilina galathea*, découvert en 1952, par 3500 mètres de profondeur dans l'océan Pacifique. Les polyplacophores ou chitons, bien que largement distribués, ne sont guère connus du grand public. Quant aux solénogastres et aux caudofovéates, en forme de ver, ce sont des curiosités de zoologistes.

Les cinq premières classes sont rassemblées au sein des conchifères, les mollusques à coquille. Les trois dernières forment les aculifères, les mollusques à piquants (même si les polyplacophores sont plutôt munis de plaques calcaires).

Ces diversités de formes donnent des diversités d'écologie, allant de grands prédateurs pélagiques, tels que les calmars, à des animaux filtreurs enfoncés dans le sédiment, tels que les palourdes ou les dentales.

Néanmoins, depuis longtemps, les zoologistes se sont rendu compte que tous ces animaux sont construits avec un nombre limité de modules organiques: un manteau qui sécrète la coquille, un pied, une tête (dotée des organes des sens) et une masse viscérale. Les tailles et formes du pied et de la coquille (donc du manteau) sont les principales sources des originalités des animaux. S'il ne fait aucun doute que cette diversité est le résultat de processus développementaux particuliers, la façon dont les gènes du développement la favorisent restait mal connue. Mais une équipe chinoise vient de mettre au jour un mécanisme en s'intéressant à une famille de tels gènes, les gènes *Hox*.

LES MOLLUSQUES, UN GROUPE À PART?

Depuis plusieurs décennies, on sait que ces gènes jouent un rôle essentiel



On rencontre ce polyplacophore de la Norvège jusqu'aux côtes ouest-africaines, ainsi qu'en Méditerranée occidentale.

Beige, rose ou brun, il porte, de part et d'autre de ses plaques dorsales, 18 touffes de soies rigides régulièrement réparties.



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

Proche cousin de *Lottia goshimai* (le conchifère cité dans l'article, découvert au Japon en 2017), ce coquillage vit sur la côte ouest de l'Amérique du Nord.



Lottia gigantea
Taille : 8 à 10 cm de long

La coquille des polyplacophores est partagée en plaques. De petits organismes comme les spirorbes les colonisent parfois, comme ici. L'absence de plaques chez les autres aculifères (munis de spicules) est une perte secondaire.

EN CHIFFRES

72 319

On compte au moins 72 319 espèces de mollusques : 940 polyplacophores, 350 solénogastres, 100 caudofovéates, 31 monoplacophores, 798 céphalopodes, 600 scaphopodes, 9 500 bivalves... et plus de 60 000 gastéropodes.

11

Chez *Lottia goshimai*, le complexe de gènes du développement en compte 11, contre 10 chez *Acanthochitona crinita*. Sa lignée en aurait perdu un au fil de l'évolution.

3

Comme tous les mollusques, *Lottia goshimai* passe par 3 stades larvaires différents avant de devenir adulte : un stade « gastrula », un « trochophore » et un « véligère ». Mais c'est en suivant l'expression de gènes du développement entre le début et la fin du stade trochophore que l'équipe de Baozhong Liu a mis en évidence une temporalité insoupçonnée de sa dynamique.



Cet animal vit sur les rochers, à l'abri du soleil, collé au substrat grâce à son pied, qui fait ventouse. Quand on le détache, il s'enroule en boule à la manière des cloportes.



Petit chiton épineux (*Acanthochitona crinita*)
Taille : 3 cm maximum

dans l'organisation des animaux à symétrie bilatérale. Structurés en un complexe, ils sont disposés de telle manière que leur ordre dans le génome calque celui de leurs expressions, échelonnées le long de l'axe antéropostérieur de l'embryon. Cette propriété, nommée « loi de colinéarité », paraît très conservée dans l'arbre du vivant : on l'observe dans plusieurs embranchements comme les arthropodes, les annélides et les vertébrés.

Chez les mollusques, en revanche, les choses sont moins claires : dans les années 2000, des études préliminaires ont révélé une expression échelonnée des gènes *Hox* chez un gastéropode, mais pas chez un autre, ni chez un céphalopode. Puis d'autres

études, en 2013, ont trouvé une telle expression chez un chiton et un bivalve. Mais en 2018, l'équipe d'Andreas Wanninger, de l'université de Vienne, en Autriche, a repris ces résultats contradictoires en se focalisant sur un dentale tout en réévaluant les résultats antérieurs. Elle a ainsi détecté, de façon très transitoire, une expression échelonnée des gènes *Hox* au cours d'un seul stade larvaire du dentale – un phénomène qu'ils ont aussi retrouvé chez les embryons des espèces de gastéropodes et de céphalopodes considérées auparavant comme négatives. En d'autres termes, tous les mollusques présenteraient bien une expression échelonnée des gènes *Hox*, mais parfois de façon très furtive.

Forts de ces résultats, Baozhong Liu, de l'institut d'océanologie de Qingdao (Chine), et son équipe se sont lancés à leur tour dans l'aventure en s'intéressant à deux organismes, chacun dans l'un des deux groupes qui constituent les mollusques : un conchifère, le gastéropode patelliforme *Lottia goshimai*, des côtes nord du Japon et de la mer de Chine, et un aculifère, le polyplacophore *Acanthochitona crinita*, dont ils ont suivi le développement des larves pas à pas, en étudiant de nombreux stades larvaires, de façon à ne rater aucune expression transitoire.

L. goshimai et *A. crinita* ont des complexes *Hox* complets, c'est-à-dire que tous

> les types de gènes *Hox* sont présents, qu'ils soient «antérieurs», «centraux» ou «postérieurs» de par leur lieu d'expression. Chez le gastéropode, les chercheurs ont tout d'abord constaté l'extrême dynamisme des expressions des gènes *Hox*: au microscope, les régions où ces gènes s'expriment changent considérablement en quelques heures. À cela, deux raisons. Pendant la gastrulation et l'organogenèse, de nombreux mouvements cellulaires ont lieu, en particulier lors de la mise en place des ébauches de la coquille et du pied. De plus, allumages et extinctions des gènes se font à un rythme inattendu: en deux heures, tout change. Il fallait vraiment suivre de nombreux stades pour en comprendre la dynamique.

UN DOS ET UN VENTRE INDÉPENDANTS

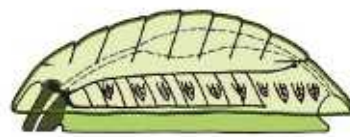
Impression générale: les territoires d'expression des gènes *Hox* se regroupent en deux zones distinctes, une dorsale et une ventrale. Pour s'en convaincre, l'équipe a procédé à un marquage supplémentaire en suivant les expressions de deux autres gènes: *engrailed*, dorsal et *soxb*, ventral. Quand le territoire d'un gène *Hox* recouvrait une partie de celui d'*engrailed*, il était qualifié de dorsal, et de ventral avec *soxb*. Cette distinction précise a permis de mettre en évidence un élément capital pour la plupart des gènes *Hox*, que Baozhong Liu a appelé «le découplage dorsoventral»: à un moment donné, un gène *Hox* s'exprime soit seulement dans un tissu dorsal ou ventral, soit dans les deux régions, mais pas avec la même intensité. De plus, ce découplage est temporel, car l'activation ou l'inhibition d'un gène n'est pas synchrone sur les deux territoires. Généralement, l'expression ventrale est plus précoce. Cela signifie qu'en fait, ce sont les mécanismes régulateurs de ces gènes qui sont découplés.

En quoi ces deux territoires différents? L'expression ventrale des gènes *Hox* suit la règle de colinéarité. Assez stable chez le polyplacophore, elle est évanescente chez le gastéropode: on ne peut l'observer que pendant deux heures! Dorsalement, en revanche, l'expression des gènes *Hox* s'organise autour de l'ébauche du tissu coquillier, c'est-à-dire du manteau, mais pas de manière échelonnée.

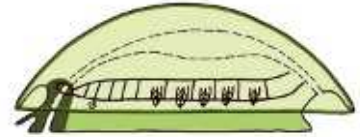
Comme ce découplage dorsoventral s'observe tant chez un conchifère que chez un aculifère, on peut l'étendre à leur ancêtre commun et donc à tous les mollusques, puisque cet ancêtre n'est autre que leur ancêtre hypothétique commun. Ainsi, le dos, où est la coquille, et le

UN MÊME PLAN D'ORGANISATION

Malgré leur diversité, les mollusques sont tous construits sur le même modèle: ils ont tous un pied, un manteau, une tête (perdue secondairement chez les bivalves) et des viscères. L'équipe de Baozhong Liu a montré que les formations des parties ventrale (pied) et dorsale (manteau) sont découplées chez ces animaux, ce qui a pu favoriser leur divergence.



Polyplacophore



Monoplacophore



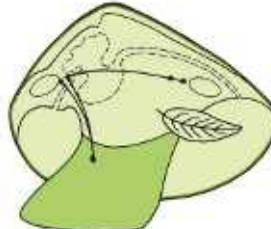
Gastéropode



Céphalopode



Scaphopode



Bivalve

tête
limite du manteau
partie ventrale (pied)
partie dorsale

BIBLIOGRAPHIE

P. Huan et al., **Dorsoventral decoupling of Hox gene expression underpins the diversification of molluscs**, *PNAS*, vol. 117(1), pp. 503-512, 2020.

T. Wollensen et al., **Staggered Hox expression is more widespread among molluscs than previously appreciated**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 285, article 20181513, 2018.

ventre, où sont le pied et le système nerveux central, sont découplés chez l'embryon et peuvent évoluer de manière relativement indépendante. Les structures dorsales présentent des coquilles, des spicules ou des plaques. Le pied peut être une bêche chez les bivalves, des tentacules chez les céphalopodes, une sole pédieuse chez les gastéropodes.

Comment ce découplage se met-il en place? Chez les bilatériens, l'organisation suivant l'axe dorsoventral (et donc, notamment, la régulation des gènes *Hox*) est sous le contrôle d'un couple de gènes majeurs, *BMP2/4* et *Chordin*. Ces gènes détendraient-ils une réponse? C'est en tout cas le pari qu'a fait l'équipe de Baozhong Liu: elle s'intéresse actuellement à l'expression de ces gènes chez *L. goshimai*. ■

L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Promesses et réalité

Une sélection d'articles
rédigés par des chercheurs
et des experts

Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €



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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



Commandez et téléchargez
les numéros en pdf



www.boutique.groupepourlascience.fr

L'AUTEUR



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

UN BON GOÛT DE BOUCHON

Les bouchons de liège libèrent dans le vin des composés dont certains ~~modifient, en bien ou en mal, le goût de la boisson. Un choix adéquat~~ du liège est ainsi susceptible d'améliorer la qualité des vins.

Le mauvais «goût de bouchon» du vin est dû principalement au trichloroanisole, composé que certains bouchons de liège libèrent; mais les chimistes ont aussi identifié d'autres molécules provenant du bouchon lors du vieillissement du vin. Des analyses avaient ainsi montré que des polyphénols de petite taille moléculaire migrent du bouchon de liège vers le vin et en modifient, positivement ou négativement, le bouquet, la saveur et l'astringence. Sofia Reis, Victor Freitas et leurs collègues de l'université de Porto, au Portugal, ont récemment repris ces analyses et suivis des échanges de tanins (*Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 68, pp. 14230-14242, 2020).

Les polyphénols sont des composés essentiels des vins. Parmi eux, les flavonoïdes viennent du raisin, mais d'autres viennent du bois des tonneaux, notamment les tanins qui contribuent à l'amertume ou à l'astringence en formant des complexes avec les protéines salivaires. Les bouchons de liège en libèrent aussi. Les chimistes portugais ont constaté que, après seulement 24 heures de mise en contact d'un bouchon de liège et d'une solution d'éthanol acidifiée (qui imite un vin), apparaissaient dans la solution de la castalagine, de la grandinine, de la vescalagine et de la roburine E – des «ellagitannins» qui doivent souvent leur nom au bois dont on les a initialement isolés (châtaigner, chêne...).

Mais alors pourquoi n'avait-on trouvé, dans des expériences précédentes s'étalant sur vingt-sept mois, que de faibles quantités de castalagine, de vescalagine et d'autres tanins? Les avait-on manqués

Le vin s'enrichit de divers composés provenant du bouchon de liège, et ces apports diffèrent selon l'origine géographique du liège.

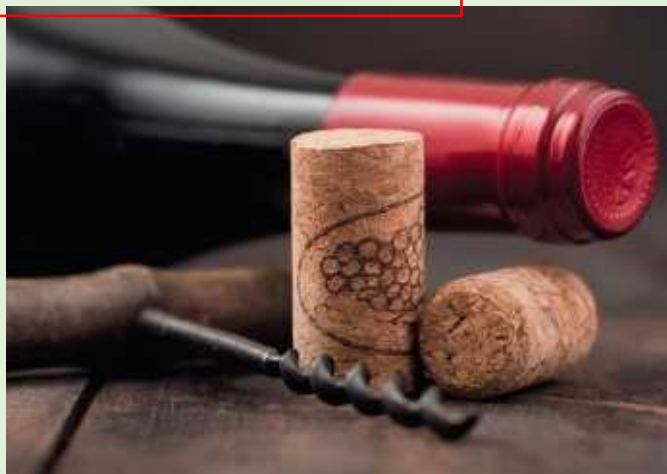
dans l'analyse initiale, qui était principalement consacrée aux petits polyphénols? Sans doute, puisqu'une étude de 2019, focalisée sur les tanins, a dressé un tableau bien différent: on a détecté ces mêmes composés dans le liège et dans des extraits éthanoliques de liège, en compagnie de composés d'une famille différente, les polysaccharides (dont font partie la cellulose, les pectines...).

Étant donné l'importance du liège pour les vins, les chimistes de Porto ont alors repris les analyses à l'aide de méthodes d'analyse plus spécifiques des gros composés, et ils ont découvert que les bouchons libéraient des ellagitannins (21 à 34%), des tanins condensés (8 à 15%) et des polysaccharides (5 à 8%), en plus d'acides phénoliques, d'aldéhydes et des autres petits polyphénols déjà détectés.

Une difficulté de ces études très longues est de savoir si les composés que l'on identifie se forment dans le liquide où s'ils proviennent directement du liège mais n'en sont que lentement libérés. Les analyses des bouchons, en plus de celles des solutions, ont montré que les ellagitannins étaient déjà présents dans les bouchons. Pour les tanins condensés, ils sont connus dans le liège depuis 1998, mais on ignorait leur degré de polymérisation; quelques précisions là-dessus ont été obtenues, mais le chapitre n'est pas clos. Quant aux

polysaccharides, dont la composition en sucres élémentaires a été identifiée, ils semblent venir des pectines des bouchons et sont parfois liés à des polyphénols.

Autre résultat intéressant: des analyses couplant spectroscopie infrarouge et méthodes chromatographiques et portant sur des bouchons d'Espagne et du Portugal ont montré que, à partir des composés phénoliques passant dans un vin modèle, on peut retrouver l'origine du liège. Mieux, ces études et celles qui suivront indiqueront comment sélectionner des bouchons pour guider l'évolution des vins, au moins pour ce qui est des polyphénols. Les vignerons en viendront-ils à guider le vieillissement de leurs vins par le choix des bouchons, au lieu de seulement subir l'influence de ces derniers? ■



LA RECETTE

1. Choisir un vin jeune et franc.
2. Prendre quelques bouchons neufs, et les râper.
3. Ajouter les râpures au vin.
4. Se procurer des pectines (poudre pour faire prendre les confitures) et les ajouter au vin.
5. Fermer hermétiquement la bouteille à l'aide d'un bouchon chimiquement inerte. Stocker quelques années pour obtenir un bon «vin de bouchon».

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 519 (Jan 21)
réf. PL519



N° 518 (Déc. 20)
réf. PL518



N° 517 (Nov. 20)
réf. PL517



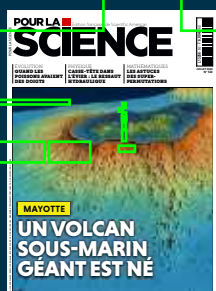
N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516



N° 515 (sept. 20)
réf. PL515



N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508

À retourner accompagné de votre règlement à :

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



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

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

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

TOTAL À RÉGLER €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°

Date d'expiration

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire :

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

Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

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



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR

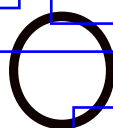
A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.64

1700 MILLIONS



On estime qu'environ trois milliards de personnes dans le monde utilisent des foyers de cuisson à bois traditionnels. Selon l'ONG Project Drawdown, le remplacement de ces foyers par des cuisinières plus « propres » (des poêles à charbon de bois à haut rendement, à gaz naturel, à énergie solaire...) réduirait la consommation de bois de 1700 millions de tonnes par an d'ici à 2050. Ces cuisinières diminueraient en outre la fumée domestique.

P.20

NOUMÈNE

En métaphysique, le noumène représente l'objet en soi et le phénomène en est une manifestation. Cette distinction s'appliquerait aussi en informatique, où un texte en soi peut prendre différentes formes.

P.40

« Il vaut mieux imaginer une prothèse qui permet une fonction, comme la saisie, quitte à ce qu'elle ne ressemble pas à une main, qu'une reproduction de la main et risquer que le cerveau ne l'incorpore pas »

ALESSANDRO FARNÈ
neuroscientifique à l'Inserm

P.54

-269°C

Au sein du réacteur ITER, dans le sud de la France, le plasma porté à une température de 150 millions de degrés avoisinera des aimants refroidis à -269°C, soit à peine 4 degrés au-dessus du zéro absolu.

P.80

DONNANT-DONNANT

Dans le dilemme du prisonnier, on interroge deux complices. Selon qu'ils avouent, nient en bloc ou que l'un trahit l'autre, les remises de peine varient. Le dilemme vient du fait que l'intérêt de l'individu est contraire à celui du groupe. Quand on itère le processus, des stratégies se dessinent. Celle du donnant-donnant consiste à trahir le complice si celui-ci a trahi au tour d'avant.

P.22

CYBERESPACE

Mis en scène depuis les années 1980 dans des œuvres de science-fiction, cet espace virtuel y est souvent le terrain de guerres de pouvoir menées par des hackers connectés à travers des interfaces homme-machine. Des romans d'anticipation à aujourd'hui, les cyberattaques sont devenues une menace géopolitique réelle.

P.92

CHITONS

Bien que rencontrés dans tous les océans du globe, ces mollusques de quelques centimètres ne sont guère connus du grand public.

Aussi nommés « polyplacophores », ils doivent leurs noms aux plaques qui composent leur coquille et à leur ceinture musculaire qui ressemble à une tunique (*chiton* en grec).

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

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

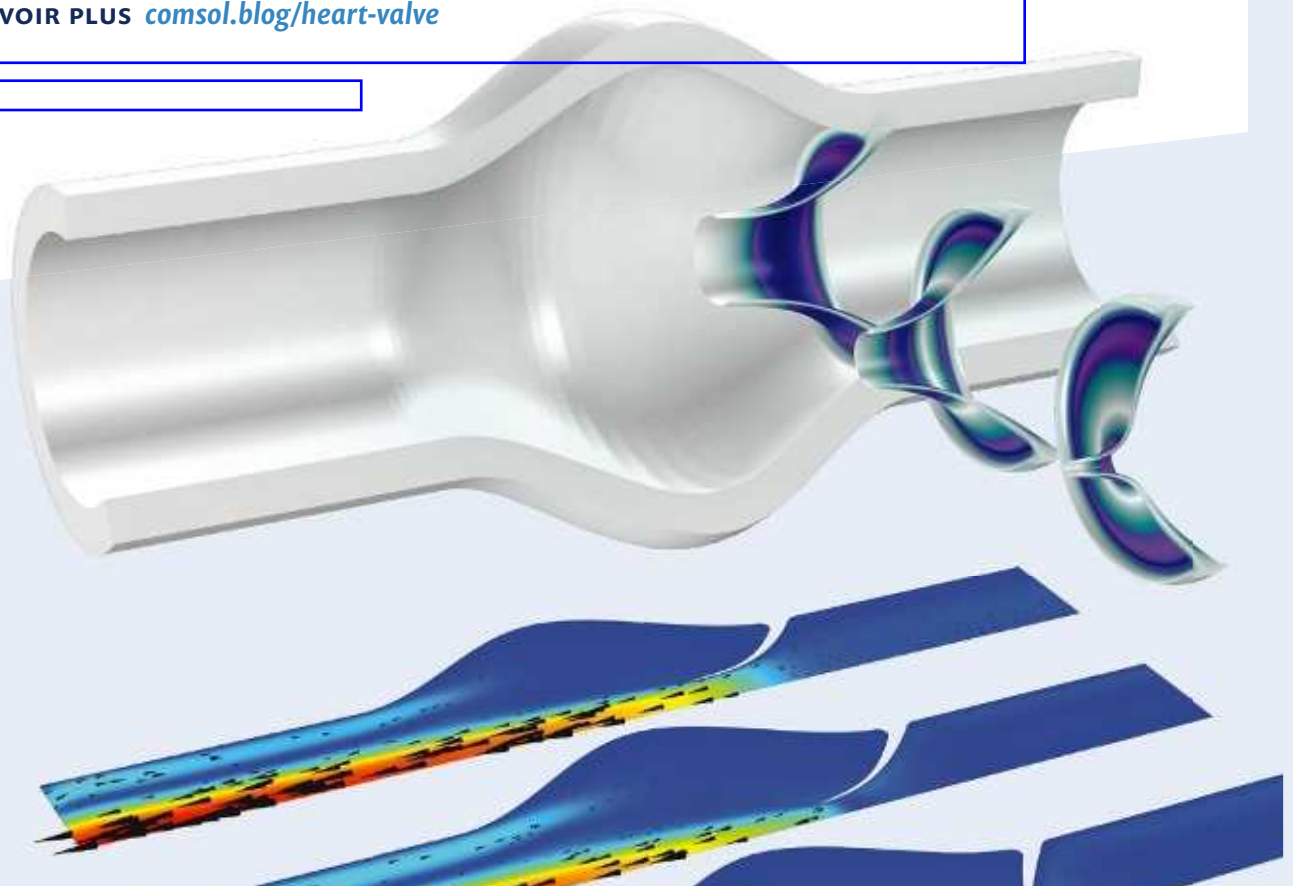
Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

ÉTUDE DE CAS

Visualiser et prédire le comportement des valves cardiaques grâce à la simulation multiphysique

S'ouvrir entièrement, se fermer hermétiquement. Les quatre valves du cœur humain devraient faire cela à chaque battement. Lorsque les valves ne fonctionnent pas correctement, des problèmes cardiaques surviennent. Dans la recherche de traitements plus efficaces, les chercheurs dans le domaine médical étudient les valves du cœur pour comprendre et prédire leur comportement. Pour visualiser avec précision le fonctionnement d'une valve cardiaque, il faut tenir compte de nombreux phénomènes couplés. C'est ce que permet la simulation multiphysique.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/heart-valve



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.