

SCIENCE

PHYSIQUE
**LA PHILOSOPHIE
DU NOUVEAU
SYSTÈME D'UNITÉS**

MATHÉMATIQUES
**LE GRAPHE QUI
CONTIENT TOUS
LES GRAPHS**

ENVIRONNEMENT
**ÉCOLOGIQUES,
LES VÉHICULES
ÉLECTRIQUES ?**

NOVEMBRE 2018
N° 493



Dossier spécial

CE QUI DISTINGUE **SAPIENS** DES AUTRES ANIMAUX

- La culture, moteur de l'évolution humaine
- Des pensées emboîtées... et partagées
- Comment le langage s'est imposé
- Un cerveau hors catégorie



FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



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

www.ademe.fr/theses

POUR LA
SCIENCE

www.pourlascience.fr

170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Lucas Streit

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Jonathan Morin

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Antoine Browaeys, Damir Buskulic, Benjamin Dessus,
Hervé Douville, Chantal Ducoux, Romain Julliard,
Estefania de Mirandès, Xavier Müller, François Nez,
François Pellegrino, France Piétry-Rouxel, Bruno Sécordel

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <https://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél. 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements -

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

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

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org

E
DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LES HUMAINS, UNE ESPÈCE BIEN SINGULIÈRE

Q

ue les humains constituent une espèce appartenant au règne animal, plus personne ne peut le contester sérieusement aujourd'hui, même si l'idée continue de gêner certains. D'un autre côté, on ne peut guère nier le caractère exceptionnel de cette espèce: *Homo sapiens* a marqué de son empreinte

l'ensemble de la planète grâce notamment à ses extraordinaires facultés cognitives, à son aptitude pour la communication, à son langage, à ses inventions matérielles et culturelles.

Peut-on trouver un dénominateur commun à toutes

ces étonnantes capacités ou identifier des facteurs susceptibles d'expliquer leur apparition au fil de l'évolution? Ce questionnement scientifique rejoint les tentatives de maints penseurs qui, dans le passé, ont cherché à définir le «propre de l'homme». La science d'aujourd'hui apporte des réponses plus précises et mieux fondées. Même si la question reste matière à recherches et à débats, elle a suffisamment progressé pour que *Pour la Science* vous propose un dossier sur ce thème (voir pages 27 à 61) - où l'on apprendra en particulier que la culture apparaît de plus en plus comme centrale dans le développement des capacités cérébrales et cognitives des humains.

Ces aptitudes de notre espèce sont certes remarquables

et admirables, mais il ne faudrait pas en tirer trop de fierté. N'oublions pas que le «propre de l'homme», tel qu'il apparaît dans l'histoire, présente aussi une face très sombre: massacres de toutes sortes et ampleurs, restrictions des libertés et exploitation d'autrui, délires collectifs de nature idéologique ou religieuse... Propre de l'homme, facteurs conjoncturels, facteurs structurels, autre chose? Peut-être la science réussira-t-elle un jour à démêler aussi cet écheveau, auquel cas l'humanité disposera, espère-t-on, de meilleures armes pour tenir à distance ses démons. ■

SOMMAIRE

N° 493 /
Novembre 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Synchroniser les neurones pour traiter la schizophrénie
- Transmuter les déchets nucléaires avec Myrrha
- Un jet « supraluminique » trahit la fusion d'étoiles à neutrons
- Twitter, miroir des communautés politiques
- Des réseaux 3D de bits quantiques
- L'audition à l'échelle des cellules
- CRISPR-Cas9 à l'assaut de la myopathie de Duchenne
- Les prix Nobel 2018

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Heurs et malheurs de la propriété privée
Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Climat: pourquoi tant d'inertie?
Gérald Bronner



En couverture :
© Tissen / shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 52

EPISTÉMOLOGIE

VERS UN SYSTÈME D'UNITÉS VRAIMENT UNIVERSEL

Nadine de Courtenay

Le Système international d'unités a été inventé pour faciliter les échanges scientifiques et commerciaux. Sa construction, tout comme sa réforme imminente, vise à la fois à intégrer les connaissances scientifiques les plus avancées et à édifier un monde social commun.



P. 62

TECHNOLOGIE

LES VOITURES ÉLECTRIQUES SONT-ELLES ÉCOLOGIQUES ?

Christopher Schrader

On présente l'adoption des voitures électriques comme une étape décisive de la transition énergétique. Mais un long chemin reste à parcourir avant que ces véhicules soient vraiment moins polluants que les voitures classiques.



P. 72

HISTOIRE DES SCIENCES

L'EAU, LE GÉOLOGUE ET LA GRANDE GUERRE

Franck Hanot et Frédéric Simien

Abreuver un million de chevaux à raison de 15 à 60 litres par jour et par animal, protéger de la boue les myriades d'hommes terrés dans les tranchées... Tels étaient les défis des géologues, acteurs méconnus de la guerre de 14-18.



POUR LA
SCIENCE.FR

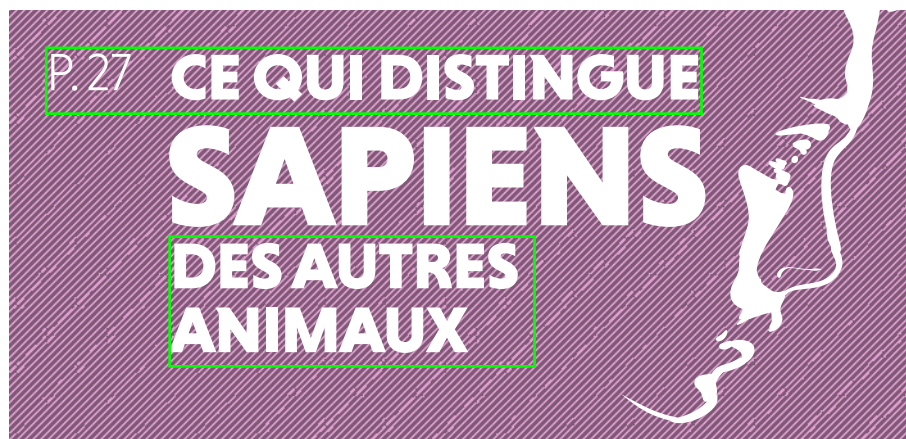
LETTRE D'INFORMATION

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



P.28 Anthropologie
LA CULTURE, MOTEUR DE L'ÉVOLUTION HUMAINE
Kevin Laland

Si notre espèce brille par son intelligence et sa créativité, c'est parce que nous sommes avant tout des animaux sociaux. Langage, empathie, enseignement... : ces éléments qui facilitent les interactions sociales et le partage des connaissances auraient été autant de clés au succès évolutif d'*Homo sapiens*.

P.36 Psychologie
DES PENSÉES EMBOÎTÉES... ET PARTAGÉES
Thomas Suddendorf

Notre capacité à imaginer des scénarios emboîtés à la façon de poupées russes, et le besoin impérieux de partager nos pensées : voilà, selon Thomas Suddendorf, ce qui nous distinguerait des animaux sur le plan mental. Et qui expliquerait notre faculté à anticiper les situations futures.

P.42 Linguistique
COMMENT LE LANGAGE S'EST IMPOSÉ
Christine Kenneally

Parmi les formes de communication rencontrées dans le monde animal, le langage humain fait figure d'exception. Comment a-t-il émergé ? Les particularités biologiques et cognitives des humains ne sont pas seules en jeu : de plus en plus, les scientifiques soulignent le rôle décisif qu'a joué la culture.

P.48 Neurobiologie
UN CERVEAU HORS CATÉGORIE
Chet C. Sherwood

Un encéphale particulièrement gros, un cortex particulièrement plissé, des connexions neuronales particulièrement nombreuses... Le cerveau humain est singulier dans le monde animal.

RENDEZ-VOUS

P.78
LOGIQUE & CALCUL

UN GRAPHE UNIVERSEL ET SINGULIER
Jean-Paul Delahaye

Qu'un seul nombre puisse contenir, dans ses décimales, tous les autres est déjà un fait étrange et troublant. Mais le monde des graphes présente une situation analogue encore plus surprenante, qui frôle le paradoxe.

P.84
IDÉES DE PHYSIQUE
Des nanobulles magnétiques pour l'informatique de demain
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P.88
SCIENCE & FICTION
Quand les arthropodes attaquent
Roland Lehoucq et J.-Sébastien Steyer

P.92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Comment l'éléphant trompe le cancer
Hervé Le Guyader

P.94
SCIENCE & GASTRONOMIE
De la lecture à dévorer
Hervé This

P.96
A RETENIR

A

CTUALITÉS

P. 6 Echos des labos

P. 18 Livres du mois

P. 20 Agenda

P. 22 Homo sapiens informaticus

P. 24 Cabinet de curiosités
sociologiques

SYNCHRONISER LES NEURONES POUR TRAITER LA SCHIZOPHRÉNIE



Des chercheurs ont mis en évidence une désynchronisation des neurones dans l'hippocampe de souris « schizophrènes ». En rétablissant la coordination de ces neurones, ils ont réussi à supprimer certains symptômes affectant les rongeurs.

Chaque personne atteinte de schizophrénie est unique, mais toutes présentent différents symptômes handicapants au quotidien. Or les traitements actuels, des antipsychotiques, ne sont efficaces que pour une partie des patients. Mieux traiter cette pathologie exige de mieux la comprendre. Thomas Marissal, de l'université de Genève, et ses collègues viennent de franchir un pas dans ce sens: ils ont mis en évidence une désynchronisation des neurones chez des souris atteintes d'une forme de

schizophrénie, et l'ont même corrigée, les rongeurs ne présentant alors plus certains symptômes de la maladie.

Trois types de symptômes caractérisent la pathologie: des délires et hallucinations visuelles ou auditives, un repliement sur soi, et des symptômes cognitifs – déficit de l'attention, hyperactivité, troubles de la mémoire et de la pensée, ainsi que difficultés à entretenir une conversation logique et cohérente. De sorte que la plupart des personnes schizophrènes, environ 1% de la population, voient leurs aptitudes intellectuelles diminuer au moment où les symptômes

apparaissent, en général à l'entrée dans l'âge adulte. Car les troubles de la mémoire et de l'attention avec hyperactivité sont tout aussi invalidants que les délires ou hallucinations.

Les neurobiologistes cherchent à comprendre comment la schizophrénie apparaît et s'installe, sachant que c'est un trouble neurodéveloppemental qui se met en place progressivement et qui dépend de facteurs à la fois génétiques et environnementaux. Toutefois, les scientifiques sont persuadés que, chez les personnes schizophrènes, toutes les aires cérébrales sont perturbées, tant les symptômes sont étendus et variés.

C'est pourquoi Thomas Marissal et ses collègues se sont intéressés à l'hippocampe de souris modèles de la schizophrénie. Ces dernières ont été « créées » en inactivant des gènes dont on sait que l'absence chez l'humain provoque un

syndrome de Di George: les personnes atteintes de ce syndrome (caractérisé par une immunodéficience primaire et diverses malformations) ont un risque de développer des troubles schizophréniques quarante fois supérieur à celui de la population générale. Ainsi, ces souris modèles présentent par exemple une hyperactivité et un déficit de mémoire, deux symptômes cognitifs de la maladie.

En examinant de plus près leur hippocampe, structure cérébrale impliquée justement dans la mémoire, les chercheurs ont constaté que les neurones de la couche notée CA1 sont désynchronisés: ils présentent le même niveau d'activité électrique que les neurones de souris normales, mais ils ne sont plus coordonnés entre eux, comme si les cellules ne communiquaient plus très bien les unes avec les autres. Et ce, parce qu'une population minoritaire d'autres neurones dans cette région de l'hippocampe, les interneurons inhibiteurs à parvalbumine, n'est plus suffisamment active. Alan Carleton, qui a dirigé cette étude, explique: « Sans cette inhibition correcte qui contrôle et structure l'activité électrique des autres neurones du réseau dans l'hippocampe, l'anarchie règne en maître. »

Ensuite, sur des tranches d'hippocampe de ces souris, *in vitro*, et grâce à des traitements pharmacologiques et des manipulations génétiques, les chercheurs ont rétabli l'activité des neurones inhibiteurs: les réseaux de neurones de la couche CA1 se sont immédiatement resynchronisés. Et quand ils ont injecté les mêmes molécules chez des souris éveillées, ces dernières ont cessé de présenter certains symptômes typiques de la schizophrénie, comme l'hyperactivité, probablement à cause d'une resynchronisation de leurs neurones.

Thomas Marissal et ses collègues sont optimistes: ils vont vérifier que la désynchronisation existe dans d'autres régions cérébrales et dans d'autres modèles animaux de la schizophrénie, voire chez l'homme, et tenter de la corriger de la même manière. Car ils pensent qu'une thérapie pharmacologique ou des manipulations génétiques ciblant les neurones inhibiteurs du même type que ceux à parvalbumine pourraient représenter un nouveau traitement de la schizophrénie dans les années à venir. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

T. Marissal et al., *Nature Neuroscience*, en ligne le 17 septembre 2018

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Transmuter les déchets nucléaires avec Myrrha

En Belgique, le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (CEN) développe une grande installation qui permettra notamment d'expérimenter la faisabilité d'une filière de réacteurs de quatrième génération et la transmutation des déchets nucléaires. Les explications du directeur du projet.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

HAMID AÏT ABDERRAHIM,
physicien des réacteurs,
dirige le projet Myrrha.

Qu'est-ce que le projet Myrrha ?

Comme l'indique cet acronyme pour l'anglais *Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications*, Myrrha est un réacteur nucléaire de recherche hybride visant des applications relatives à la médecine nucléaire, aux matériaux utilisés dans les réacteurs à fission et à fusion, et à la transmutation des déchets nucléaires.

Pourquoi « hybride » ?

Parce qu'il couplera un accélérateur de protons à hautes énergies et intensité (dont la construction, d'ici à 2024, est la première phase du projet) à un réacteur nucléaire sous-critique, c'est-à-dire dont le cœur contient trop peu de combustible pour que la réaction en chaîne s'autoentretienne. Pour maintenir en fonctionnement un tel réacteur, il faut des réactions de fission supplémentaires, que l'on obtient en créant des neutrons à l'aide du faisceau de protons. Comme le réacteur est contrôlé par l'accélérateur, il est très sûr : si l'on coupe le faisceau, la réaction s'éteint en une microseconde.

Mettre au point un tel réacteur fait partie de vos objectifs ?

Oui ! Ce type de réacteur à neutrons rapides représente l'une des six filières envisagées pour la quatrième génération. Notre but est de tester son fonctionnement à l'échelle semi-industrielle. Pour le refroidir, nous y ferons circuler un mélange plomb-bismuth, qui est liquide à 123 °C. Cela se traduira, dans le circuit de refroidissement, par des températures relativement basses, donc faciles à gérer. Le plomb-bismuth a cependant l'inconvénient de corroder l'acier des canalisations, mais on sait réduire ces effets en introduisant un peu d'oxygène dans le circuit, de façon à en passer les parois par des couches d'oxyde de fer et de chrome.

Et en quoi peut-il servir à transmuter les déchets nucléaires ?

Le temps de séjour moyen des barres d'uranium dans les réacteurs à eau pressurisée actuels est de 4,5 ans. Au bout de cette période, une tonne de combustible s'est muée en 56,6 kilogrammes (kg) de produits de fission, 12 kg de plutonium, 1 kg de neptunium, 0,8 kg d'américium, 0,6 kg de curium, et il reste 930 kg d'uranium. Si l'on peut en partie réutiliser dans du combustible reconditionné le plutonium, qui est hautement toxique et radioactif, les autres actinides mineurs (le neptunium, l'américium et le curium) sont aujourd'hui laissés dans la soupe issue des opérations de séparation. Une fois vitrifiés, on les stocke sous terre, où il faudra entre 300 000 ans et 1 million d'années pour que leur radiotoxicité redescende au niveau de celle de l'uranium. D'où l'intérêt de les transmuter en espèces beaucoup moins radiotoxiques. C'est possible dans un réacteur tel celui de Myrrha, dont le principe permet de « brûler » des barres de combustible contenant jusqu'à 50 % d'actinides mineurs. Nous avons estimé que 40 ans suffiraient pour transmuter tous les déchets nucléaires qu'a produits l'Allemagne, de sorte que leur radiotoxicité redescendrait au niveau de celle de l'uranium en 300 ans seulement.

Qui finance le projet ?

Ses trois phases successives devraient demander de l'ordre de 1,6 milliard d'euros. Or dans le cadre de son programme ESFRI (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*), la Commission européenne a reconnu Myrrha comme une grande infrastructure d'intérêt paneuropéen. Après que le gouvernement belge a déjà dépensé 200 millions d'euros pour lancer les études, il vient d'en débloquer 558 millions supplémentaires pour réaliser la première phase. Sur cette base, nous cherchons à intéresser de nombreux partenaires, à commencer par les grands pays que sont la France, l'Allemagne, l'Italie, le Royaume-Uni et le Japon. ■

ASTROPHYSIQUE

UN JET « SUPRALUMINIQUE » TRAHIT LA FUSION D'ÉTOILES À NEUTRONS

L'explosion à l'origine d'un sursaut gamma a engendré un jet de particules qui semblent se déplacer plus vite que la lumière. Or un tel jet est émis lors de la fusion de deux étoiles.

Le 17 août 2017, l'observatoire spatial *Fermi* détectait une puissante bouffée de rayons gamma en provenance de la galaxie NGC 4993, distante d'environ 130 millions d'années-lumière. Les caractéristiques de ce « sursaut gamma », noté GW170817, suggèrent qu'il résulte de la fusion de deux étoiles à neutrons. Mais comment en être sûr ?

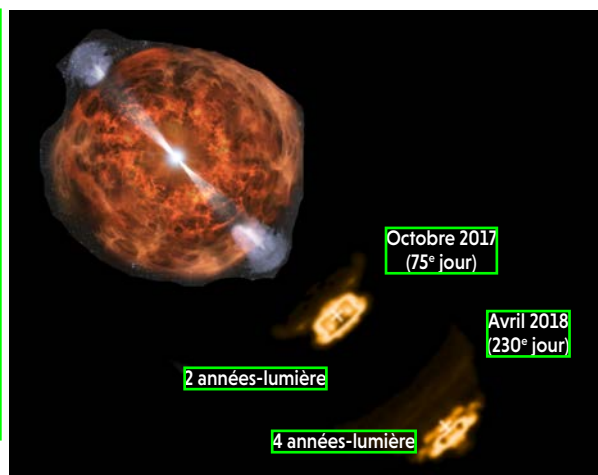
En observant l'émission en ondes radio qui a suivi le sursaut gamma, l'équipe de Kunal Mooley, de l'Institut de technologie de Californie, a mis en évidence que la région à l'origine de cette émission s'est déplacée à une vitesse apparente supérieure à celle de la lumière. Or seule la présence d'un jet de matière relativiste – progressant à une vitesse proche de celle de la lumière – peut expliquer un tel phénomène. Et comme, d'après les théoriciens, la fusion d'étoiles à neutrons s'accompagne de l'émission d'un jet de matière très rapide et très étroit, l'observation d'un jet relativiste associé au sursaut gamma indique qu'il s'agit bien ici d'une fusion d'étoiles à neutrons.

Les sursauts gamma comptent parmi les événements les plus lumineux de l'Univers. On pense qu'ils sont dus à l'effondrement d'une étoile en un trou noir, ou à la fusion d'objets compacts tels que des étoiles à neutrons. D'une durée allant de quelques millisecondes à plusieurs heures, le pic de rayonnement initial est en général prolongé par des émissions rémanentes à des longueurs d'onde plus grandes, qui persistent parfois plusieurs centaines de jours après le sursaut.

La relative proximité du sursaut gamma GW170817 a permis à l'équipe de Kunal Mooley d'observer en détail son émission radio rémanente 75 et 230 jours après l'événement, à l'aide des radiotélescopes de Green Bank, VLA et VLBA. Ces observations révèlent que durant ce laps de temps, la source radio semble avoir parcouru 2 années-lumière, c'est-à-dire s'être déplacée... 4 fois plus vite que la lumière !

Cette vitesse supraluminique est cependant une illusion d'optique, classique en astronomie. Elle se produit lorsqu'une source de rayonnement se déplace à une vitesse avoisinant celle de la lumière dans une direction proche de celle de l'observateur. La source étant presque aussi

Cette vue d'artiste illustre le déplacement de la source radio associée au sursaut gamma GW170817. Durant les 155 jours qui séparent les deux observations, elle a semblé se déplacer de 2 années-lumière, soit 4 fois plus vite que la lumière. Cette illusion résulte du fait que le jet de matière à l'origine de l'émission radio est dirigé vers la Terre et se déplace presque à la vitesse de la lumière.



4 fois

LA VITESSE
DE LA LUMIÈRE :
TELLE EST LA
VITESSE APPARENTE
DE LA SOURCE RADIO
ASSOCIÉE AU
SURSAUT GAMMA
GW170817.

rapide que la lumière qu'elle émet, les photons émis au 230^e jour arrivent sur Terre peu après ceux émis au 75^e jour, donnant l'illusion d'un intervalle de temps bien plus court, et donc d'un déplacement plus rapide de la source.

Par conséquent, les chercheurs voient dans cette situation la signature d'un jet de particules relativiste et très directionnel. Leurs simulations suggèrent que le jet a une ouverture inférieure à 5 degrés, que sa vitesse atteint 97 % de celle de la lumière, et qu'il est vu depuis la Terre avec un angle d'environ 20 degrés.

Kunal Mooley et ses collègues proposent le scénario suivant: la fusion de deux étoiles à neutrons a entraîné une explosion cataclysmique qui a propulsé une enveloppe de débris dans l'espace. Le trou noir résultant de la fusion a commencé à accréter de la matière, donnant naissance à deux jets de part et d'autre du disque d'accrétion. L'interaction des jets avec les débris a engendré un «cocon» de matière en expansion. La collision de celui-ci avec le milieu interstellaire serait l'origine de l'émission radio rémanente durant les premiers mois, après quoi le jet serait sorti des ejecta, devenant alors la source radio dominante. ■

LUCAS STREIT

K. P. Mooley *et al.*, *Nature*, vol. 561, pp. 355-359, 2018

POULPE SOUS ECSTASY

La MDMA, la molécule de l'ecstasy, est un psychotrope connu pour ses effets socialisants chez l'humain. Les Américains Eric Edsinger et Gül Dölen ont montré que la pieuvre à deux points de Californie, une espèce solitaire et asociale, va plus avec ses congénères sous l'influence du psychotrope. Celui-ci se fixerait sur une protéine proche d'un récepteur humain de la sérotonine, un neurotransmetteur. La sérotonine régulerait donc les comportements sociaux depuis longtemps – avant la séparation des lignées des humains et des pieuvres, il y a plus de 500 millions d'années.



APELINE CONTRE SARCOPÉNIE

La diminution des capacités musculaires due à l'âge, la sarcopénie, est l'une des causes de la perte d'autonomie des personnes âgées. S'il n'existe pas encore de stratégie efficace pour la stopper ou l'inverser, un espoir est désormais porté par l'apeline – une hormone que produisent notamment les muscles lorsqu'ils se contractent – grâce aux travaux de Claire Vinel, de l'Institut des maladies métaboliques et cardiovasculaires (Inserm, université Paul-Sabatier), à Toulouse, et de ses collègues.

« Nous avons mis en évidence que l'apeline améliore l'état des mitochondries, les usines énergétiques des cellules. Comme le vieillissement implique une altération de ces organites, nous nous sommes penchés sur l'effet de l'apeline sur les cellules des personnes âgées », explique Cédric Dray, qui a dirigé l'étude avec Philippe Valet. L'équipe a ainsi montré que plus le muscle est actif, plus il produit d'apeline. Mais à mesure que l'âge progresse, les muscles

perdent leur capacité à la produire. L'équipe a donc administré de l'apeline à des souris âgées. Leurs muscles ont gagné en masse et leurs performances ont augmenté. Ces éléments permettent d'envisager l'apeline à la fois comme un outil diagnostique de la sarcopénie et comme une solution pour son traitement.

Mais comment l'apeline joue-t-elle un rôle bénéfique sur les muscles? L'équipe a montré qu'elle stimule le métabolisme cellulaire en favorisant à la fois la genèse des mitochondries, l'autophagie (un processus qui fait le « ménage » dans la cellule) et la synthèse de protéines. Elle stimule aussi la régénération des myofibrilles à partir de cellules souches.

Des essais cliniques seront menés à partir de 2019 pour évaluer l'efficacité de l'apeline sur la sarcopénie humaine, et une pilule devrait être disponible dès l'année prochaine. Mais que les amateurs de biceps rebondis ne se réjouissent pas trop vite: chez les souris jeunes qui produisent déjà naturellement de l'apeline, en rajouter n'améliore pas les performances musculaires. ■

ALINE GERSTNER

C. Vinel et al., *Nature Medicine*, vol. 24, pp. 1360-1371, 2018

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs
formation
entreprises

Organisme
de formation continue



250 formations technologiques courtes proposées
par le CNRS dans ses laboratoires de recherche

pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens



Domaines de formation

Big data et IA, génie logiciel, sciences de l'ingénieur, chimie, biologie, microscopie, urbanisme, enjeux sociétaux... et plus encore

+ de 1300 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

[@CNRS_CFE](https://twitter.com/CNRS_CFE)

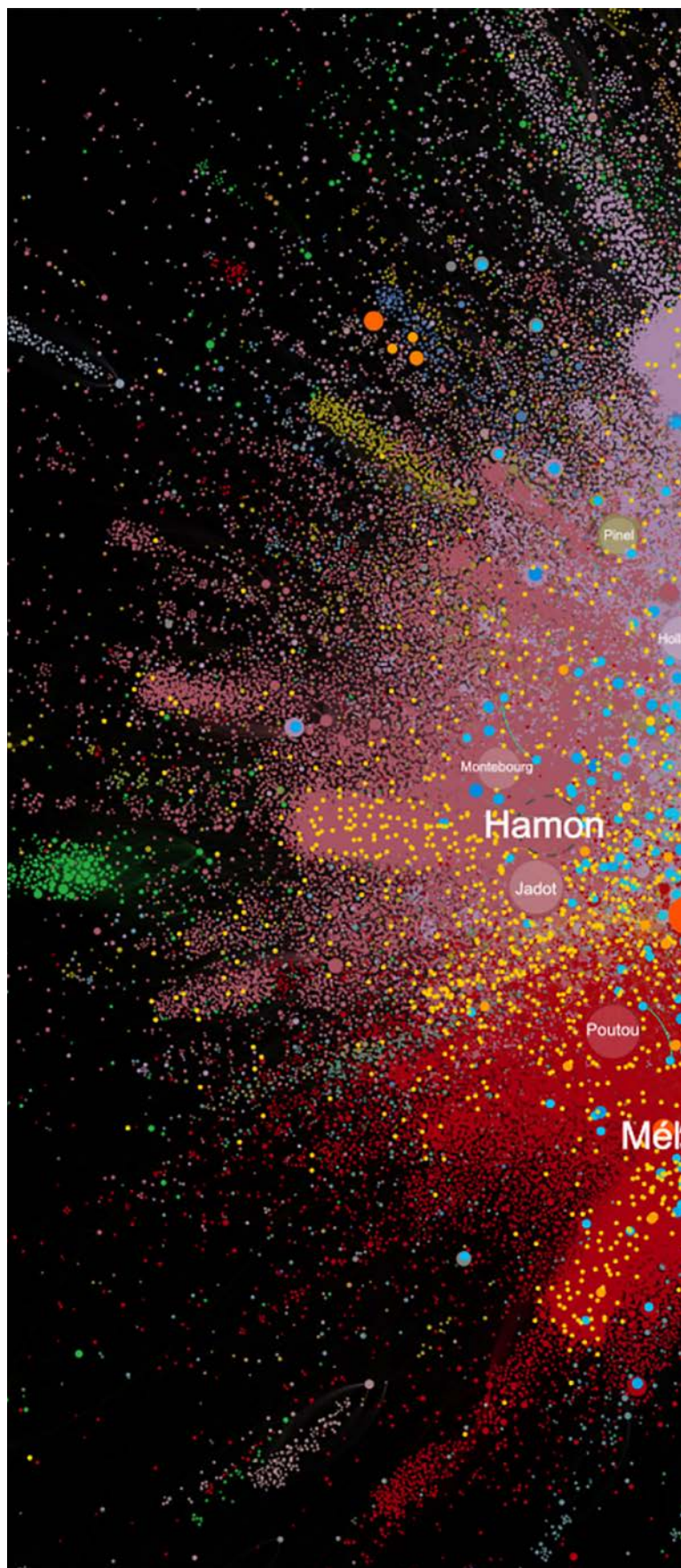
EN IMAGE

TWITTER, MIROIR DES COMMUNAUTÉS POLITIQUES

Depuis leur apparition sur la Toile, les réseaux sociaux bouleversent la communication des partis politiques et les dynamiques électorales. David Chavalarias et ses collègues, de l'Institut des systèmes complexes de Paris-Île-de-France, ont identifié les communautés politiques sur la twittosphère française au cours des mois précédant l'élection présidentielle de 2017, à partir de 60 millions de tweets échangés entre 2,4 millions de comptes. La proximité idéologique des utilisateurs (*la distance entre points, ci-contre*) a été déterminée par le nombre de retweets entre comptes. L'équipe a coloré les comptes «affiliés» aux cinq partis majoritaires, placés sur l'image de gauche à droite. Pour valider son modèle, elle a vérifié manuellement l'orientation politique de plusieurs milliers d'utilisateurs pris au hasard, à partir des métadonnées des profils. L'adéquation de cette sous-population avec le modèle a été évaluée à 93% pour les comptes les plus actifs. Cela montre qu'il est déjà possible de réaliser des campagnes électorales ciblées en fonction d'une estimation fiable des opinions politiques simplement à l'aide des données récoltées sur les réseaux sociaux.

Par ailleurs, cette cartographie politique a permis d'étudier la répartition et l'intensité (*la taille des points*) des échanges, entre les communautés politiques, de fausses informations (*fake news, les cercles orange*) et de leurs réfutations (*debunks, les cercles bleu-vert*) identifiées par des journalistes du Monde. On observe que les réfutations sont plus dispersées sur le réseau que les fausses informations, et que ces dernières sont concentrées majoritairement dans les camps Fillon (50,75%) et Le Pen (22,21%). Les fausses informations semblent ainsi, sans surprise, davantage polariser l'opinion publique que leurs réfutations. ■

J. S.

D. Chavalarias et al., *PLoS One*, vol. 13(9), article e0201879, 2018



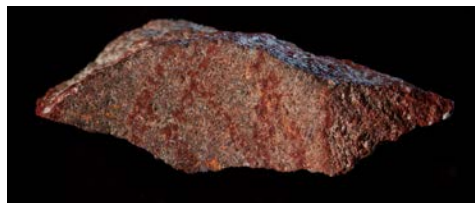
PRÉHISTOIRE

PREMIER DESSIN AU CRAYON

L'humanité a très tôt utilisé le rouge pour dessiner. Des croisillons tracés à l'ocre sur un éclat de pierre taillée découvert en 2001 dans la grotte de Blombos, en Afrique du Sud, le prouvent: une équipe de préhistoriens dirigée par Francesco d'Errico, du CNRS, vient de confirmer leur origine humaine.

Cette validation relevait un peu de l'acquit de conscience, car les conditions de la découverte ne laissaient guère de place au doute. L'éclat de pierre en question, noté L13, d'environ 4 centimètres de long, provient en effet d'une strate datant de 73000 ans, dans laquelle ont été découverts des objets typiques de l'industrie lithique dite de Still Bay. Or cette strate a aussi livré plusieurs morceaux d'ocre gravés de croisillons ressemblant à ceux de L13.

Pour être néanmoins absolument certains de la facture du motif tracé sur l'éclat L13, les chercheurs ont entrepris de le reproduire en essayant différentes techniques: l'équivalent



préhistorique d'une mine de crayon, c'est-à-dire un morceau d'ocre taillé en pointe, mais aussi un pinceau et une «peinture à l'ocre». L'étude microscopique, chimique et tribologique a montré que les lignes obtenues au crayon d'ocre ressemblent très étroitement à celles de l'éclat de pierre L13. C'est d'autant plus significatif que le motif a été en partie effacé par le séjour dans la terre et par le rinçage après la fouille, avant que le dessin n'ait été remarqué.

Ainsi, L13 et les morceaux d'ocre gravés montrent que les habitants de Blombos avaient pour habitude de tracer des lignes entrecroisées. Pourquoi? Le fait que le même motif se retrouve sur plusieurs supports suggère une représentation symbolique. ■

FRANÇOIS SAVATIER

C. S. Henshilwood et al., *Nature*, en ligne le 12 septembre 2018

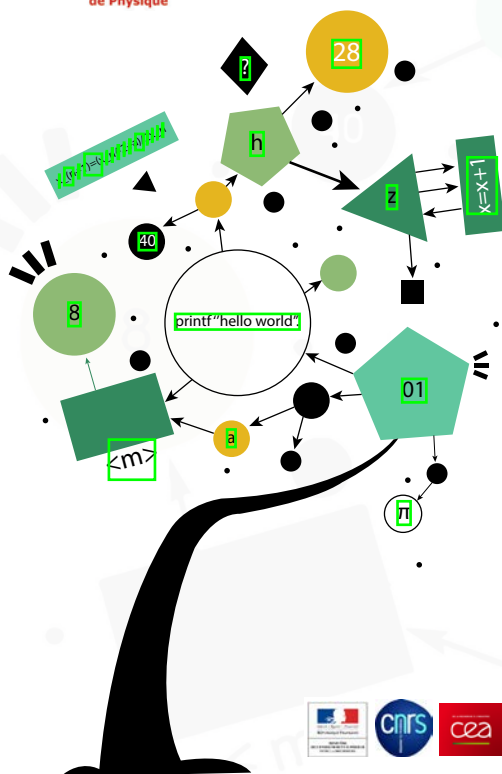
EN BREF

DES ÉTOILES QUI TOURNENT COMME LE SOLEIL

Notre Soleil tourne plus vite à l'équateur qu'à ses pôles. Othman Benomar, de l'université de New York-Abu Dhabi, et ses collègues ont observé un profil de rotation similaire pour au moins treize autres étoiles situées à quelques centaines d'années-lumière de la Terre. Avec le télescope *Kepler*, ils ont mesuré les modes de pulsation de chaque étoile. Ces modes sont des ondes acoustiques dues à la convection turbulente de surface. Ils engendrent une variation du flux lumineux de l'étoile, mesurable depuis la Terre. C'est de la différence de propagation entre ces différents modes visibles dans le signal que les chercheurs ont déduit la vitesse de rotation en fonction de la latitude.



Société Française de Physique



{BnF

QUELS ALGORITHMES POUR COMPRENDRE LA NATURE ?

16^e rencontre de "Physique et Interrogations Fondamentales"

AU PROGRAMME

- Conférences données par des physiciens, mathématiciens, philosophes, ingénieurs, musiciens, juristes, etc.
- Une table ronde : "Intelligence artificielle & intelligence collective"
- Séance de **dédicaces**

10 NOVEMBRE 2018

Bibliothèque nationale de France - 75013 Paris

Entrée libre - sur inscription : www.pif16.fr



LA STRATÉGIE DES OISILLONS

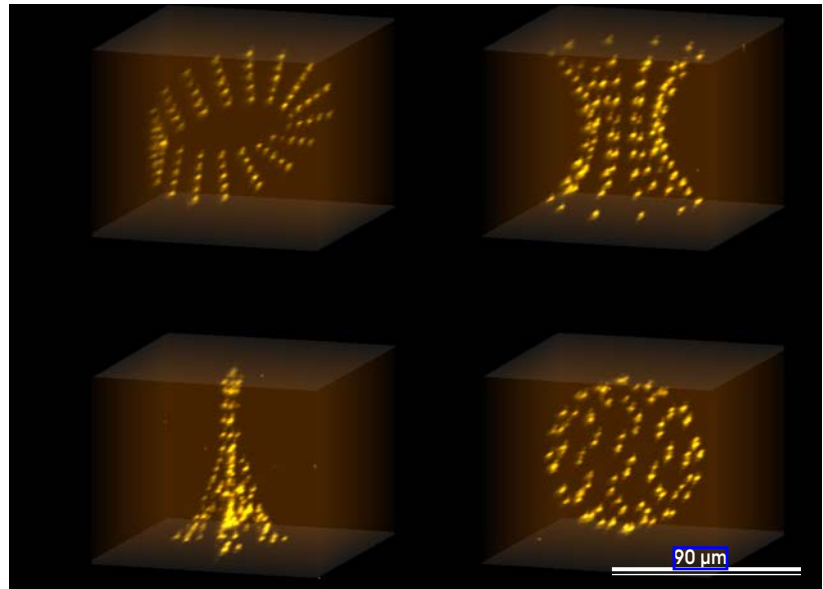
Quelle est l'heure idéale, quand on est un jeune oiseau, pour prendre son envol et quitter le nid? Partir tôt dans la journée, pour maximiser les chances de trouver un refuge avant la nuit, ou le plus tard possible, pour profiter une dernière fois de la nourriture apportée par les parents? En suivant à l'aide de minicaméras l'envol des oisillons de deux cents nids de passereaux des prairies aux États-Unis et au Canada, Christine Ribic, de l'Institut d'études géologiques des États-Unis, et ses collègues ont noté l'heure à laquelle le premier oisillon quittait le nid, puis la durée avant l'envol du dernier. L'heure du premier envol était très variable d'une espèce à l'autre et la période d'envol de la nichée était d'autant plus étalée que les oisillons étaient nombreux – un argument en faveur de la stratégie énergétique. ■

CORALINE MADEC

C. Ribic et al., *The Auk Ornithological Advances*,
vol. 135(4), pp. 1100-1112, 2018

PHYSIQUE

DES RÉSEAUX 3D DE BITS QUANTIQUES



Ces structures tridimensionnelles et microscopiques de points lumineux permettent de piéger en chacun d'eux un atome, qui joue le rôle de qubit.

CLIMATOLOGIE

PLUS DE CRUES EN AMAZONIE

L'Amazonie est le plus vaste bassin versant sur Terre. Or plusieurs études suggèrent que le cycle hydrologique de la région s'est intensifié depuis une quinzaine d'années, avec plus de sécheresses intenses et de pluies torrentielles. En étudiant les relevés des crues effectués depuis 1905 à la confluence du fleuve Amazone et du Rio Negro, Jonathan Barichivich, de l'université australe du Chili, et ses collègues ont confirmé le phénomène: le niveau d'urgence est atteint environ tous les quatre ans depuis le début du **xxi^e** siècle, contre tous les vingt ans au début du **xx^e** siècle. En comparant les relevés des crues et les enregistrements météorologiques, ils ont aussi noté que la circulation atmosphérique locale contribue fortement à la modulation des précipitations. Depuis les années 1990, la différence de température entre les océans Pacifique et Atlantique tropicaux augmente. Ce qui renforce les courants ascendants au-dessus de l'Amazonie, et favorise ainsi l'occurrence de fortes précipitations. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

J. Barichivich et al., *Science Advances*,
vol. 4, article eaat8785, 2018

Dans la course à l'ordinateur quantique, l'un des défis est de **déterminer le support physique** de l'information. Ions, électrons, atomes, circuits supraconducteurs...: de nombreux candidats au titre de qubit, le bit d'information de l'ordinateur quantique, sont testés. Et il faut un dispositif capable de les accueillir. Dans le cas d'atomes, des systèmes optiques de piégeage en une ou deux dimensions avaient déjà été réalisés. Daniel Barredo et ses collègues, de l'Institut d'optique du CNRS, à Palaiseau, ~~ont réussi à piéger des atomes dans des structures lumineuses à trois dimensions, à les déplacer et à les faire interagir.~~

Pour ce faire, les physiciens diffractent un faisceau laser et focalisent la lumière résultante en des points particuliers de l'espace. Ces points peuvent être organisés en divers motifs: cubes, sphères, pyramides, etc. Chacune de ces structures peut servir de support à des atomes, préalablement refroidis (par laser également) pour être pratiquement immobiles: les atomes sont attirés vers les points où l'intensité lumineuse est maximale. Chaque atome, ou qubit, occupe alors un site de la structure lumineuse. Et on peut les déplacer en appliquant le même principe, en focalisant une lumière laser plus intense sur un site et en déplaçant le point lumineux. Pour faire interagir deux qubits voisins, on place ces atomes dans des états très excités à l'aide d'un autre laser de fréquence appropriée. Dans de tels états, dits de Rydberg, le nuage électronique de l'atome s'étend loin du noyau et les deux atomes peuvent alors interagir, en dépit des cinq micromètres qui séparent deux sites voisins.

Les structures réalisées, qui contiennent jusqu'à 72 atomes, ne sont pas seulement intéressantes en vue de l'ordinateur quantique. Elles peuvent aussi servir à simuler des systèmes quantiques, par exemple un petit cristal magnétique. ■

DONOVAN THIEBAUD

D. Barredo *et al.*, *Nature*, vol. 561, pp. 79-82, 2018

NEUROPHYSIOLOGIE

L'AUDITION À L'ÉCHELLE DES CELLULES

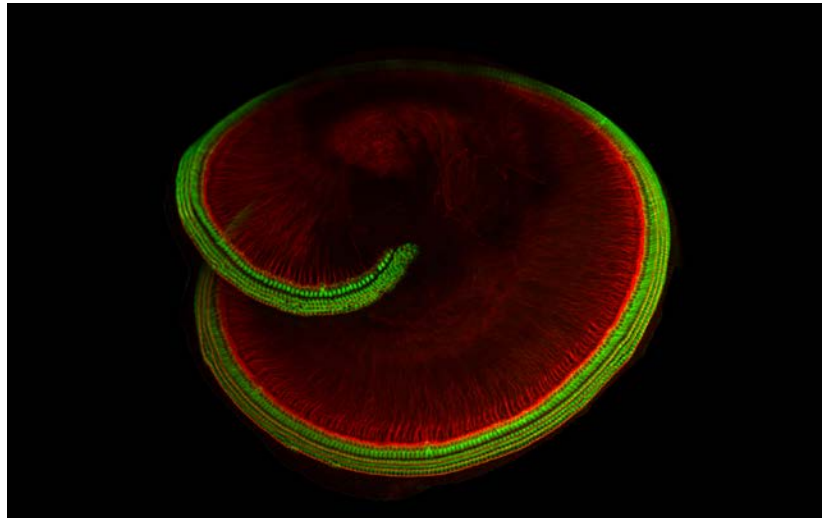
Les mécanismes cellulaires de l'audition sont encore mal connus. Deux études précisent comment le son est converti en signal neuronal et transmis au cerveau.

Seize mille cellules sensorielles pour l'oreille interne, contre une centaine de millions pour la rétine. Rares et difficiles d'accès, les cellules impliquées dans l'audition, ou cellules ciliées, sont encore mal connues. Mais l'équipe de Jeffrey Holt, de l'université Harvard, aux États-Unis, a identifié une protéine de ces cellules qui joue un rôle clé dans la conversion du son en signal électrique. Par ailleurs, François Lallemend, de l'institut Karolinska, à Stockholm, et ses collègues ont décrit de nouvelles catégories de neurones contribuant à la transmission de ce signal au cerveau.

«On connaît le mécanisme qui convertit le son en signal électrique depuis les années 1970: les ondes acoustiques perturbent les stéréocils des cellules ciliées de l'oreille interne. Des canaux s'ouvrent à la surface des cellules et laissent des ions potassium et calcium y pénétrer. Il restait à identifier la protéine qui constitue le canal», explique Jean-Luc Puel, spécialiste de l'audition à l'Institut des neurosciences de Montpellier. Depuis quelques années, diverses études suggéraient qu'une protéine nichée dans la membrane cellulaire, TMC1, participait au système auditif. En combinant biochimie, imagerie moléculaire et bio-informatique, Jeffrey Holt et ses collègues ont étudié la structure de TMC1 dans la membrane: elle ressemblerait à une autre protéine connue pour former des canaux.

Ils ont ensuite modifié certains acides aminés de TMC1 dans des cellules ciliées de souris. Sur les 17 modifications testées, 11 perturbaient le flux d'ions dans les cellules, 5 le réduisaient de 80% et une le bloquait. Pour les chercheurs, la protéine TMC1 constituerait donc bien le canal d'entrée ionique, même s'il n'est pas exclu que d'autres protéines y contribuent. Comme des mutations de cette protéine sont impliquées dans certains types de surdité, cela laisse entrevoir des thérapies ciblées.

L'équipe de François Lallemend s'est intéressée à l'étape suivante – la transmission du signal vers les relais centraux auditifs par les neurones du ganglion spiral. Les chercheurs savaient déjà que ces neurones, dits de type 1, n'ont pas tous les mêmes caractéristiques: des seuils d'activation à des intensités sonores basse, moyenne ou haute et une activité spontanée plus ou moins



La cochlée, un petit os en forme de coquille d'escargot, est tapissée de cellules ciliées (en vert). Indispensables pour l'audition, elles convertissent le son en signal électrique.

élevée. Un même neurone s'adaptait-il aux différents signaux sonores ou existait-il plusieurs catégories de neurones adaptés à chaque signal? En étudiant le transcriptome (l'ensemble des ARN transcrits à partir du génome) de neurones individuels, François Lallemend et ses collègues ont montré, en même temps que deux autres équipes, que les neurones de type 1 comptent au moins trois catégories. Ces différentes populations sont présentes dès la naissance chez la souris, avant même une quelconque activité neuronale. Leur maturation nécessiterait une activité neuronale (l'exposition à un son) et impliquerait la répression de l'expression de gènes. Il reste à vérifier si ces catégories correspondent à des fonctions différentes.

L'équipe envisage aussi de sonder de même les neurones des relais centraux. «Disposer de marqueurs de populations est fondamental pour comprendre la physiopathologie de ces neurones: ceux ayant un seuil haut sont plus fragiles en cas de trauma sonore et peuvent être perdus avec l'âge. Il sera aussi intéressant d'identifier les neurones concernés dans des pathologies comme les acouphènes ou l'hyperacousie», estime Jean-Luc Puel. ■

NOËLLE GUILLON

B. Pan et al., *Neuron*, vol. 99(4), pp. 736-753, 2018; C. Petitpré et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 3691, 2018

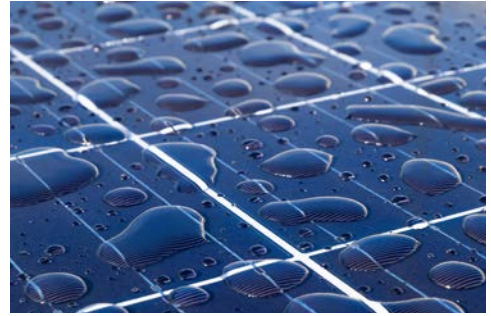
NEUROTRANSMISSION VÉGÉTALE ?

Quand une chenille attaque la moutarde des champs, deux minutes suffisent à la plante pour rendre indigestes ses feuilles indemnes. Masatsugu Toyota, de l'université de Saitama, et ses collègues ont montré que ce système de défense se met en place via un mécanisme ressemblant à la neurotransmission des vertébrés. La blessure libérerait dans le système vasculaire de la plante du glutamate (un neurotransmetteur chez les vertébrés), qui ouvre des canaux ioniques dans la membrane des cellules. Des ions calcium entrent alors dans les cellules jusqu'aux feuilles les plus éloignées, où ils déclenchent la contre-attaque (production de composés toxiques, répulsifs ou indigestes et d'une hormone de défense).

LES DEUX VISAGES DU TiO_2

Le dioxyde de titane, TiO_2 , est utilisé comme revêtement photocatalyseur des dispositifs photovoltaïques. Il a été observé que les surfaces de TiO_2 , hydrophiles en présence d'air et de rayonnement ultraviolet, deviennent hydrophobes dans le noir, ce qui limite leurs capacités autonettoyantes. De plus, une mystérieuse couche recouvre systématiquement le matériau en contact avec l'air. En l'étudiant par microscopie à effet tunnel et spectroscopie, Jan Balajka, de l'université technique de Vienne, et ses collègues ont montré qu'elle est constituée d'acides formique et acétique. Présents en quantités infimes dans l'air, ils se fixent aux atomes de titane plus efficacement que les autres composés grâce à leur tête acide qui a deux points de fixation (les atomes d'oxygène) au lieu d'un seul.

Ces acides ont la propriété d'être à la fois hydrophobes grâce à leur queue constituée de carbone et d'hydrogène, et très solubles dans



Pourquoi le TiO_2 des panneaux photovoltaïques est-il hydrophile le jour et hydrophobe la nuit ?

l'eau grâce à leur tête. Pour Jan Balajka, le mystère du TiO_2 est levé : sous rayons ultraviolets, il réagit avec l'eau et produit des molécules instables, lesquelles oxydent les composants organiques adsorbés à sa surface. Cela produit des résidus hydrophiles qui facilitent l'arrivée d'eau et, par là, l'évacuation des résidus et des acides formique et acétique. Dans le noir, le TiO_2 capte ces mêmes acides, qui reforment la couche hydrophobe. ■

MARTIN TIANO

J. Balajka et al., *Science*, vol. 361, pp. 786-789, 2018

InSight sur Mars

atterrissage à haut risque !

lundi 26 novembre
— à 17h

cité
sciences
et industrie

Vivez en direct l'atterrissage de la sonde qui écoutera battre le cœur de Mars
► informations sur cite-sciences.fr - rubrique Conférences

PARTENAIRES DE LA MISSION ET DE L'ÉVÉNEMENT



PARTENAIRES DE L'ÉVÉNEMENT



PARTENAIRES MÉDIAS



MÉDECINE

CRISPR-CAS9 À L'ASSAUT DE LA MYOPATHIE DE DUCHENNE

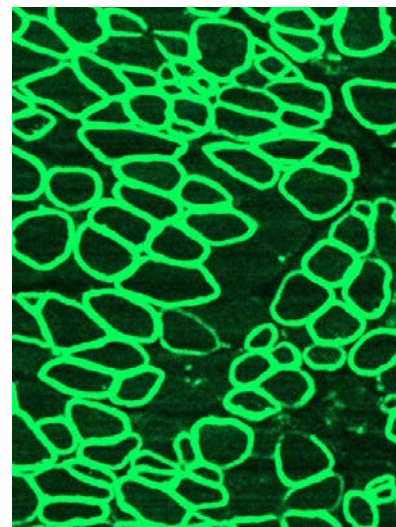
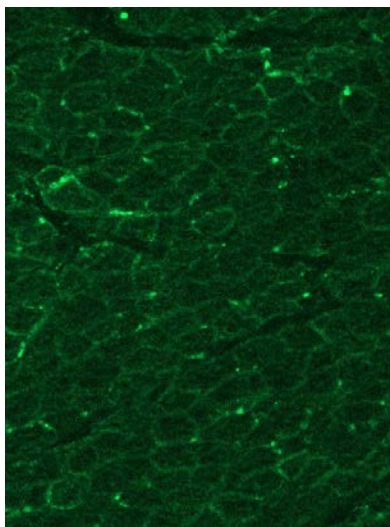
En supprimant une mutation du gène responsable de la maladie chez des chiens, des biologistes ont restauré l'expression de la protéine associée, la dystrophine.

La myopathie de Duchenne, ou dystrophie musculaire de Duchenne (DMD), est une maladie génétique rare due à diverses mutations sur le gène *DMD*, situé sur le chromosome X. Ce gène code une protéine, la dystrophine, impliquée dans le maintien de l'intégrité de la fibre musculaire au cours de la contraction. Le manque de dystrophine entraîne une dégénérescence progressive de l'ensemble des muscles, cœur et diaphragme inclus. L'équipe d'Eric Olson, du UT Southwestern Medical Center, au Texas, vient d'apporter la preuve de principe qu'il est possible, grâce à la technique CRISPR-Cas9 d'édition des gènes, de corriger une des mutations chez de grands animaux – en l'occurrence des chiens.

L'équipe a d'abord introduit les composants nécessaires à la correction du gène par CRISPR-Cas9 dans un petit virus non pathogène présentant une affinité pour les cellules musculaires. Le modèle canin de la myopathie de Duchenne porte une mutation correspondant à un endroit du gène *DMD* souvent muté chez les patients humains. Cette mutation a l'intérêt d'être contournable «facilement»: en supprimant une portion voisine d'ADN, on restaure une traduction correcte du gène en protéine. C'est donc cette portion que les chercheurs ont ciblée avec la technique CRISPR-Cas9.

Ils ont ensuite injecté des milliards de copies du virus à quatre chiots atteints de la maladie. Deux d'entre eux ont reçu l'injection par voie intramusculaire. Six semaines plus tard, les fibres des muscles traités exprimaient la dystrophine à un niveau atteignant environ 60% de celui de chiens sains. Les deux autres chiots ont reçu l'injection en intraveineuse, afin que le virus atteigne toute la musculature corporelle. Huit semaines plus tard, la dystrophine était exprimée dans un grand nombre de muscles à des niveaux variés: 5% du niveau «normal» pour la langue, 64% pour le biceps et jusqu'à 92% pour le cœur chez le chien ayant reçu la plus forte dose du traitement.

Un avantage de la technique serait de n'avoir qu'une injection à faire pour corriger le gène une fois pour toutes. Il reste cependant de nombreuses étapes à franchir avant



Chez des chiens dont les muscles (ici du diaphragme) ne produisaient plus de dystrophine (à gauche), des chercheurs ont rétabli sa production à l'aide de la technique CRISPR-Cas9 (à droite en vert).

**1 sur
3 300**

DANS LE MONDE, ENVIRON 1 GARÇON SUR 3 300 EST ATTEINT DE LA MYOPATHIE DE DUCHENNE À LA NAISSANCE. LES FEMMES ATTEINTES N'ONT EN GÉNÉRAL PAS DE SYMPTÔMES OU SOUFFRENT D'UNE FORME PEU SÉVÈRE DE LA MALADIE.

d'envisager un traitement pour les humains, comme reproduire l'expérience sur un plus grand nombre d'animaux et sur des temps plus longs, et s'assurer que CRISPR-Cas9 ne modifie pas d'autres gènes que celui visé.

CRISPR-Cas9 rejoint ainsi deux autres pistes thérapeutiques prometteuses, le saut d'exon et la microdystrophine. Les exons sont les portions des gènes qui sont traduites en protéines; le saut d'exon consiste à forcer les cellules à omettre, lors de l'épissage (la phase qui élimine les portions non traduites), les séquences du gène *DMD* qui portent les mutations à l'origine de la maladie. Déjà testée chez des patients, la technique a obtenu une autorisation de mise sur le marché aux États-Unis, mais son efficacité reste à améliorer. La microdystrophine est une version «raccourcie», mais fonctionnelle, du gène de la dystrophine. «Introduite chez des chiens atteints de la maladie, elle a restauré de bons niveaux d'expression de la protéine», explique Caroline Le Guiner, de l'université de Nantes, dont l'équipe a contribué à ces résultats. «Des essais cliniques sont en cours aux États-Unis, dont les premiers résultats devraient arriver en 2019.» ■

A. G.

L. Amoasii et al., *Science*, vol. 362(6410), pp. 86-91, 2018

MÉDECINE

THÉRAPIE ANTICANCER

Le prix Nobel de physiologie ou médecine a été attribué à James Allison, de l'université du Texas, et Tasuku Honjo, de l'université de Kyoto, pour leur découverte d'une thérapie anticancéreuse par inhibition de freins du système immunitaire. Dans les années 1990, James Allison et ses collègues ont découvert qu'une protéine de l'organisme (CTLA-4) empêche les réactions immunitaires de s'emballer. Lever ce frein déclenche la prolifération de cellules immunitaires, ce qui renforce la lutte contre certaines tumeurs. L'équipe de Tasuku Honjo a découvert un autre frein, la protéine PD-1, qui conduit les cellules qui la portent à s'autodétruire. Or des cellules cancéreuses leurrent cette protéine et déclenchent l'auto-destruction des cellules immunitaires qui la portent. Des thérapies visent à lever ce frein. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2018/>

BIOCHIMIE

ÉVOLUTION DIRIGÉE

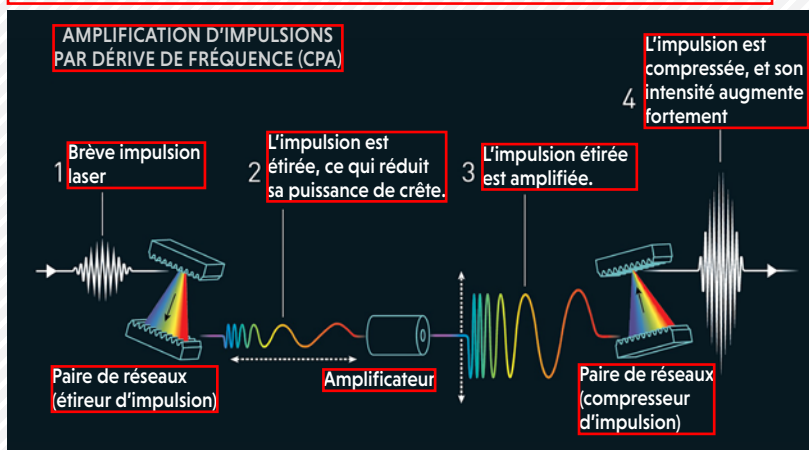
Les humains ont appris à sélectionner les plantes pour augmenter les rendements agricoles. Au fil des générations, ils ont ainsi peu à peu orienté leur évolution. Les trois lauréats du prix Nobel de chimie ont développé des outils pour accélérer et diriger l'évolution en laboratoire. En 1993, Frances Arnold, à l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont élargi le rôle d'enzymes à des environnements inhabituels. Leur technique est couramment utilisée à présent. En 1985, George Smith, à l'université du Missouri, à Columbia, a mis au point une méthode pour produire un peptide à la surface de phages (virus de bactéries). À l'aide d'un anticorps spécifique, il a ensuite pu pêcher les phages qui avaient produit le peptide. Cette technique, nommée *phage display*, permet de produire et sélectionner rapidement de nouvelles protéines. En 1990, enfin, Gregory Winter, à l'université de Cambridge, l'a utilisée pour produire des anticorps thérapeutiques. ■

M.-N. C.

<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2018/>

PHYSIQUE

LA PHYSIQUE DES LASERS À L'HONNEUR



La technique CPA permet d'obtenir des impulsions laser très intenses et brèves. Au lieu d'amplifier directement l'impulsion, on l'étire d'abord dans le temps, ce qui réduit sa puissance. L'impulsion est ensuite amplifiée puis recomprimée en un temps très bref, devenant ainsi très intense.

Le prix Nobel de physique récompense cette année deux inventions qui ont révolutionné les utilisations du laser et ont ouvert la voie à de nouveaux domaines de recherche et à nombre d'applications.

Arthur Ashkin, des laboratoires Bell à Holmdel, aux États-Unis, a inventé les « pinces optiques », systèmes qui permettent d'attraper des particules, des virus et des cellules vivantes, et même des atomes, avec des faisceaux laser. Peu après l'invention du laser en 1960, Arthur Ashkin essayait de déplacer et contrôler de petites particules grâce à la pression de radiation de la lumière laser. À l'aide de lentilles focalisant le rayon, il parvint à piéger les particules au point où l'intensité lumineuse est la plus forte : la pince optique était née. Dans les années 1980, il étendit cette méthode aux atomes, puis aux bactéries et même aux cellules, parvenant à les capturer sans les détruire. Dès lors, la technique des pinces optiques fut largement utilisée pour étudier la machinerie du vivant. Elle a par exemple permis d'étudier des moteurs moléculaires comme la kinésine en action à l'intérieur des cellules.

La Canadienne Donna Strickland, de l'université de Waterloo, et le Français Gérard Mourou, membre du haut-collège de l'École polytechnique, ont pour leur part développé en 1985 une technique permettant de produire des impulsions laser ultrabrèves et très puissantes. Cette méthode, nommée amplification d'impulsions par dérive de fréquence (*chirped pulse amplification*, ou CPA) est à la fois simple et élégante : prenez une brève impulsion laser, étirez-la dans le temps, amplifiez-la et compressez-la de nouveau. Allonger l'impulsion réduit sa puissance de crête, ce qui permet de l'amplifier sans endommager le dispositif. L'impulsion est ensuite compressée dans un temps très bref ; elle contient alors plus de photons dans un même volume : son intensité augmente de façon spectaculaire.

La technique CPA a ouvert la voie à de nombreuses applications en physique, en chimie et en médecine. Grâce aux lasers femtosecondes (impulsions de l'ordre de 10^{-15} seconde), on peut par exemple étudier le déroulement des réactions chimiques, et des lasers de haute intensité sont utilisés quotidiennement dans les opérations de chirurgie oculaire. ■

PHILIPPE RIBEAU-GÉSIPPE

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/press-release/>



PHYSIQUE

DU MERVEILLEUX CACHÉ DANS LE QUOTIDIEN

Étienne Guyon (dir.), José Bico, Étienne Reyssat et Benoît Roman

Flammarion, 2018
320 pages, 24 euros

La physique devenant de plus en plus abstraite, nul ne peut plus en comprendre les progrès et les sujets... Rien n'est moins vrai ! Ce livre, à mettre entre toutes les mains tant il est réalisé avec un soin... merveilleux, le démontre.

Notre Univers est magnifique

et étonnant, mais travailler à le comprendre émerveille encore davantage, tant cela accroît le sentiment de beauté tout en procurant la satisfaction de percer quelque peu ses secrets. Non content d'en découvrir de nouvelles facettes, le physicien explique la logique et les mécanismes. En explorant plus profondément que l'artiste, qui admire et s'inspire de ce merveilleux, et en allant plus loin que le religieux, qui s'extasie et le vénère mais sans l'expliquer, le chercheur scientifique entre dans le détail et analyse à toutes les échelles les mécanismes de notre monde, dont ceux du quotidien.

Les trente-cinq thèmes

indépendants de ce livre, tous remarquablement illustrés, vous conduiront des constructions végétales, animales et humaines (toiles d'araignées, nids, squelettes des éponges, Tour Eiffel, châteaux de sable) aux structures variées des assemblages de fils (ponts suspendus au-dessus du vide faits de petites herbes, cheveux mouillés, tissages et tressages, etc.). En passant, vous découvrirez la physique des plis qui apparaissent instantanément quand on chiffonne un papier, les formes du bord d'une feuille de salade, les craquelures du tableau de la Joconde, les bulles d'une coupe de champagne, etc. Sans équations !

JEAN-PAUL DELAHAYE

LABORATOIRE CRISTAL, UNIVERSITÉ DE LILLE

UFOLOGIE

J'AI VU UN OVNI

Xavier Passot

Cherche Midi, 2018
176 pages, 17 euros

L'auteur, ancien directeur du Geipan, le Groupe d'étude et d'information sur les phénomènes aérospatiaux non identifiés, propose de nous montrer comment fonctionne cet organe du Cnes (le Centre national d'études spatiales).

Des témoignages de différentes origines sont recueillis notamment par l'intermédiaire des gendarmeries. Il s'agit alors de les examiner, de les expliquer éventuellement ou de classer les observations parmi les phénomènes inexplicables. Ce sont particulièrement les procédures rigoureuses mises en œuvre qui sont intéressantes à connaître. Une méthodologie scientifique est employée pour analyser les récits des témoins. Avec l'expérience des quarante ans passés et l'avancée des sciences, ces méthodes s'affinent et permettent de mener des enquêtes quasiment policières.

Inversement, l'étude des

témoignages est un apport notamment aux sciences sociales, sans oublier les questions des médias et de la défense. Des recherches sont ainsi menées par des laboratoires de psychologie cognitive pour améliorer la collecte et l'étude des dépositions dans le cadre judiciaire. Lors des entretiens, le témoin est soigneusement pris en considération. Il ne faut pas qu'il sorte frustré de son expérience si les conclusions sont celles de l'observation d'un phénomène banal, par exemple des lanternes thaïlandaises ou Vénus.

De nombreux cas sont décrits. L'objectif n'est pas de démontrer à tout prix les témoignages, mais de chercher à savoir ce qu'a vu le témoin, compte tenu de l'état actuel des connaissances. Il ne faut pas attendre de ce livre des révélations fracassantes, puisque les cas restés inexplicables sont par définition... sans explication pour le moment !

Ce livre contient beaucoup d'informations données avec objectivité et clairvoyance, sans préjugés. Un ouvrage simple et instructif qui permet de mettre en éveil l'esprit critique.

JEAN COUSTEIX

ISAE-SUPAERO, TOULOUSE

ETHOLOGIE

À QUOI PENSENT LES POISSONS ?

Jonathan Balcombe

La Plage, 2018

352 pages, 19,95 euros

Ne pas reconnaître d'intelligence aux animaux ou condamner tout anthropomorphisme à leur sujet sont des attitudes qui ne sont plus de mise aujourd'hui. « Vertu, démocratie et maintien de la paix ont leur place dans les sociétés de poissons », écrit Jonathan Balcombe. Un poisson est « un individu doté d'une personnalité et de relations familiales et sociales. Il est capable de planifier et d'apprendre, de percevoir et d'innover, de consoler et de manigancer, et aussi de connaître des moments de plaisir, de peur, de gaieté, de souffrance et - peut-être bien - de joie. »

En voilà, de l'anthropomorphisme ! Mais il se fonde sur de très nombreuses expériences, observations, anecdotes, études révélant, chez maintes espèces de poissons, des capacités, tant individuelles que sociales, impressionnantes et diversifiées.

Le livre de J. Balcombe témoigne aussi de façon impressionnante de l'imagination des hommes : pour traquer ce qui se passe « dans la tête » des poissons, ils conçoivent des protocoles d'une astuce formidable.

Le lecteur non spécialiste ne peut plus se réfugier dans un *a priori* d'incrédulité, habitué qu'il est désormais à apprendre que telle ou telle aptitude insoupçonnée vient d'être découverte chez des animaux terrestres. Les poissons ne sont pas moins doués, mais nous nous en rendons compte plus tard : le milieu dans lequel ils vivent rend leur étude difficile.

Le livre relève à la fois de la vulgarisation scientifique et du militantisme. L'auteur ne s'en tient pas à constater les prouesses des poissons. Il dénonce aussi la cruauté de l'humanité qui, par la pêche, leur inflige des souffrances énormes.

DIDIER NORDON

ESSAYISTE

PALEOANTHROPOLOGIE

DERNIÈRES NOUVELLES DE SAPIENS

Silvana Condemi
et François Savatier

Flammarion, 2018

160 pages, 12 euros

Après le remarquable *Néandertal, mon frère* (Flammarion, 2016), la paléoanthropologue Silvana Condemi et le journaliste scientifique (de *Pour la Science*) François Savatier ont prolongé leur dialogue : comme dans toute relation qui dure, les affûteurs ne sont plus de mise et l'absolu est privilégié. Cela explique le petit format de ce livre qui dresse un état des connaissances sur l'histoire de notre espèce, mais aussi pointe le moteur de son évolution.

Le premier aspect épargne au lecteur une énième compilation autour des « origines » de l'homme ; on leur en saura gré. Le deuxième - et c'est aussi un soulas - ne s'appuie pas sur une thèse à la mode : il n'y est pas privilégié une théorie catastrophique (l'adaptabilité à un environnement que l'humain dégraderait en permanence) ni remis en avant une forme de religiosité sécurisante (la force de l'homme serait de croire en des choses qui n'existent que dans son imagination).

Pour nos auteurs, *Homo sapiens* serait un « animal autodomestique » et la culture jouerait un rôle dans sa conformation biologique : l'homme ne vit pas dans la nature, mais dans la société. Comme, avant eux, l'anthropologue Maurice Godelier l'a souligné et analysé, les humains ne se contentent pas de vivre en société, ils doivent « produire de la société » pour vivre. Dans le présent ouvrage, la thèse est portée par des constats factuels. Les recherches de Sonia Harmand, en particulier, servent à éclairer la démonstration. Découverts au Kenya, des outils lithiques taillés, datés de plus de 3 millions d'années (et donc antérieurs à l'apparition du genre *Homo*), pointeraient que la biologie (pré)humaine et la culture (pré)humaine coévoluent depuis avant *Homo* : la culture serait notre accélérateur d'évolution. Là où, dans la végétation dense, les autres animaux suivent ou tracent une coulée, *Sapiens* est entraîné par sa culture, sort de son territoire, explore et transforme le monde.

DOMINIQUE GARCIA

PROFESSEUR D'ARCHÉOLOGIE, PRÉSIDENT DE L'INRAP

ET AUSSI



VINGT OBJETS QUI ONT TRANSFORMÉ NOTRE VIE

Marie-Christine de la Souchère

Ellipses, 2018

240 pages, 16 euros

Il y a de la science et de l'histoire dans des sciences derrière les objets du quotidien. Avec un grand talent de vulgarisation, l'auteure les explique dans le cas de vingt objets : les pots catalytiques, les ampoules de basse consommation, les clés USB, le laser, les disques optiques, le stylo-bille, le GPS, la poêle Tefal... Le style précis et simple de l'auteur rend enfin claires les logiques techniques qui se sont succédé jusqu'à l'apparition des objets que nous connaissons. Idéal pour se cultiver par petits morceaux tout en se libérant de l'angoisse de ne pas comprendre ce qui nous entoure.

OSER, RÉSISTER

Jean Malaurie

CNRS Éditions, 2018

288 pages, 19 euros

Deuples arctiques « naturés », « peuples racines », « vitalisme sauvage », « en danger de progrès »... En 1950-1951, l'auteur des *Derniers Rois de Thulé* accomplit une mission « décisive » à Thulé, au Groenland, qui l'oblige à consacrer [sa] vie entière à la défense de ces peuples et de cet espace menacé. Il se voyait « condamné [...] à ne pas admettre que l'existence de ces hommes du Grand Nord [...] n'avait aucun sens. » La pensée intime de Jean Malaurie se dévoile dans cet ouvrage, où, entre arcanes institutionnels au CNRS et autres organismes, expéditions, rôle international et références au « chamane Uutaaq », il exprime son style si bien résumé par le titre.

PENSER COMME UN ARBRE

Jacques Tassin

Odile Jacob, 2018

144 pages, 16,90 euros

Nous ignorions que les arbres pensaient, et rien dans cette évocation de tout ce que les arbres sont pour nous ne le suggère... Dans ce petit livre, un chercheur en écologie végétale au Cirad évoque de nombreux aspects des arbres, afin de nous faire ressentir, *in fine*, que ces grands végétaux sont à la fois le milieu d'origine des grands primates que nous sommes et une composante essentielle de la symbiose dans laquelle nous devrions rester avec la nature.

PARIS

JUSQU'AU 5 MAI 2019
Musée des Arts et Métiers
www.arts-et-metiers.net

Sur mesure Les 7 unités du monde



Le kilogramme, le kelvin, la mole, l'ampère, la seconde, le mètre et la candela: telles sont les sept unités de base du SI, le Système international des unités. À la mi-novembre, les quatre premières bénéficieront d'une nouvelle définition, construite à partir des constantes fondamentales de la physique (voir l'article de Nadine de Courtenay, pages 52 à 61). En écho à cet événement capital pour la métrologie, l'exposition du musée des Arts et Métiers initie ses visiteurs à l'univers de la mesure en expliquant ses enjeux (scientifiques, industriels, commerciaux, humanistes...), le rôle des étalons et leur nature, l'omniprésence de la mesure dans notre quotidien... Le tout illustré par de nombreux objets, souvent surprenants comme ce pséphographe du début du xx^e siècle, une « machine à voter » qui mesurait l'opinion, par exemple à la sortie d'une salle de spectacles. ■

ET AUSSI

Mercredi 7 novembre
Maison de la chimie - Paris
maisondelachimie.com
CHIMIE, NANOMATÉRIAUX, NANOTECHNOLOGIES

Un colloque ouvert au grand public et où sont présentées plusieurs thématiques des nanosciences et de leurs applications dans le domaine de la santé, en microélectronique...

Jeudi 8 novembre, 18 heures Campus Joseph Aiguier Marseille
provence-corse.cnrs.fr
VOITURE AUTONOME, DRONE, ROBOTIQUE...

Une conférence de Nacer M'Sirdi, du Laboratoire d'informatique et systèmes à Marseille, qui explique le rôle des technologies de l'information et de la communication dans le développement de ces systèmes automatiques.

Vendredi 30 novembre et samedi 1^{er} décembre
Le Lieu unique - Nantes
www.lelieuunique.com
DEMAIN, SURHUMAINS ?

Deux après-midi et soirées de conférences, discussions et tables rondes sur les questions d'éthique liées aux techniques d'amélioration du corps et de l'esprit, à la robotique, au transhumanisme...

Jeudi 29 novembre, 19 h
Théâtre de Lunéville (54)
Tél. 03 83 76 48 60

RÊVES ET MOTIFS

À l'aide de ses techniques optiques, la compagnie Les Rémouleurs met en images des extraits de *Récoltes* et *Semaillles*, texte foisonnant et étrange écrit par le mathématicien Alexandre Grothendieck. Également le vendredi 30 novembre à 20 h 30.

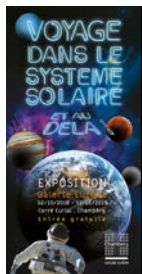
Le 21 novembre, 18 h 30
Cité de l'espace - Toulouse
www.cite-espace.com
MISSION BEPICOLOMBO

Trois spécialistes travaillant sur BepiColombo animent une conférence sur cette mission spatiale qui emporte deux sondes à destination de Mercure (et qui devrait décoller d'ici à cette date).

CHAMBERY

JUSQU'AU 12 JANVIER 2019
Galerie Eurêka
www.chambery.fr/galerie.eureka

Le Système solaire et au-delà



De grandes photographies, des textes explicatifs, des dispositifs interactifs et ludiques font voyager virtuellement les visiteurs dans l'espace à la découverte des planètes, lunes, astéroïdes et autres corps célestes, et leur font prendre connaissance de quelques-unes des trouvailles astronomiques les plus récentes. ■

NANTES

JUSQU'AU 6 JANVIER 2019
Le Lieu unique
www.lelieuunique.com

Par-delà l'horizon liquide



Treize artistes de divers pays (Estonie, Royaume-Uni, Pays-Bas, Finlande...) présentent des installations, sculptures, vidéos ou œuvres sonores qui expriment leurs visions du futur de notre monde et de ses mutations actuelles, qu'il s'agisse de l'univers numérique ou robotique, d'écologie, de biomédecine... ■

PARIS

DU 7 NOVEMBRE AU 9 DÉCEMBRE 2018
Cité des sciences et de l'industrie
www.cite-sciences.fr

Arctique : nouvelle frontière



Un groupe de Nénètes, péninsule de Yamal (nord de la Sibérie occidentale), avril 2018.

Le Russe Yuri Kozyrev et le Néerlandais Kadir van Lohuizen, de l'agence Noor, sont lauréats en 2018 du prix Carmignac du photojournalisme, grâce auquel ils ont réalisé leur projet de parcourir la région arctique et témoigner des effets du changement climatique. Cette exposition présente leurs belles photographies. Chaque année depuis 2009, le prix Carmignac soutient la production d'un reportage d'investigation sur les violations des droits humains dans le monde et les enjeux environnementaux et stratégiques associés. ■

MONTBÉLIARD

JUSQU'AU 3 MARS 2019
Le Pavillon des sciences
www.pavillon-sciences.com



Géographes

En quoi consistent les recherches des géographes aujourd'hui, quels sont leurs enjeux? Notamment à travers des jeux et manipulations, cette exposition répond à la question en présentant plusieurs problématiques actuelles: le développement des villes et l'étalement urbain, le marketing territorial et la conception des paysages, la géopolitique locale. ■

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 11 novembre, 9 h
Allauch (Bouches-du-Rhône)
Tél. 04 42 20 03 83

MASSIF D'ALLAUCH

Une excursion géologique sur les chemins de Pagnol. Le massif d'Allauch domine le bassin de Marseille, et ses vallons offrent de belles coupes géologiques.

Les 14, 16, 24 et 30 novembre
Rosnay (Indre)
Tél. 02 54 28 12 13

GRUES CENDRÉES

Balade d'un étang à l'autre à la rencontre du plus grand oiseau sauvage de France, à l'occasion de sa migration d'automne vers le sud de l'Europe.

Samedi 24 novembre, 9 h
Créteil (94)
Tél. 01 48 90 69 57

LA PETITE VENISE DU VAL-DE-MARNE

Observation des passereaux et des oiseaux d'eau dans cet îlot de verdure préservé le long du Bras du Chapitre et des îles de Créteil.

LES { Partagez les savoirs } RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr,
rubrique :
"les rendez-vous du Muséum"

POUR LA
SCIENCE

UN CHERCHEUR, UN LIVRE

Lundi 5 novembre - 18h : La vie au Muséum. Ed. Muséum-Delachaux et Nestlé, 2018.

Portraits d'hommes et de femmes aux parcours de vie atypiques et aux métiers et savoir-faire insolites.

Échanges animés par Valérie Agha avec : Grégory Drouot, technicien graphiste, Muséum ; Isabelle Huynh, taxidermiste restauratrice, Muséum ; Hélène Gauvain, détachée à l'atelier de restauration d'ouvrages anciens, Muséum.

PROJECTION / DÉBAT

Cycle Interactions homme / environnement

Samedi 17 novembre - 15h : Décentrement et ré-enchantement : l'enregistrement de terrain pour un nouvel usage sonore du monde
Alexandre Galand, Docteur en histoire, art et archéologie, Université de Liège.

CONFÉRENCE / DÉBAT CYCLE ACTU

Lundi 19 novembre - 18h : Quels enjeux pour l'agroécologie ?

Margaux Alarcon, modératrice, doctorante ; Julien Blanc, anthropologue de l'environnement, Muséum ; Denis Couvet, écologue, Muséum ; Emmanuelle Porcher, écologue, Muséum.

LES MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 25 novembre - 15h : Économiste

de l'environnement, Catherine Aubertin
Directrice de recherche à l'Institut de recherche pour le développement IRD/Muséum.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

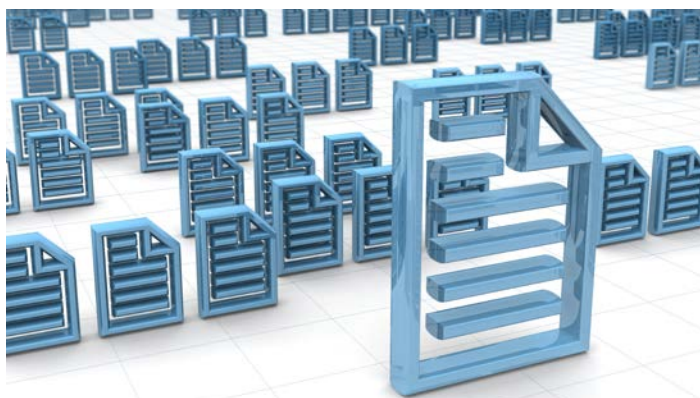




LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

HEURS ET MALHEURS DE LA PROPRIÉTÉ PRIVÉE

L'informatique bouscule la notion de propriété. De ce fait, révolutionnera-t-elle la société bien plus radicalement que l'action politique ?



Un morceau de musique, un texte ou toute autre information mise sous une forme numérisée est très facile à dupliquer et à partager. En rester le propriétaire est donc, de facto, difficile.

Dans son livre *Homo sapiens technologicus*, le philosophe Michel Puech suggère que le lave-linge a changé la vie des femmes, et de quelques hommes, davantage que n'importe quelle décision politique. Cette remarque nous mène à nous interroger sur l'efficacité relative de deux stratégies de transformation du monde, la technique et l'action politique, grâce à un exemple : la propriété privée.

Depuis la fin du XVIII^e siècle, plusieurs mouvements politiques, influencés par la pensée de Gracchus Babeuf, Pierre-Joseph Proudhon, Karl Marx, Friedrich Engels et d'autres, tentent d'éliminer la propriété privée ou d'en restreindre la portée, avec, à certains moments, quelques succès, telle la création d'entreprises publiques. Mais, malgré ces succès, ces mouvements ne semblent pas réellement mettre la propriété privée en danger. Celle-ci, en revanche, est sévèrement menacée par le développement de l'informatique.

Une première raison est que l'informatique fabrique des objets immatériels,

duplicables à coût nul, tels des programmes ou des données. Quand une mine produit un sac de charbon, elle ne peut pas le transformer, sans coût, en deux sacs identiques. Mais quand un informaticien écrit un programme, il peut le transformer, sans effort, en deux programmes identiques. Dans le premier cas,

Même si elle ne disparaît pas, la propriété privée recule

se pose la question de la personne autorisée à utiliser ce sac de charbon – personne que nous appelons le « propriétaire » du sac de charbon. Dans le second, nul besoin d'identifier un propriétaire, puisque le programme peut être dupliqué ad libitum et utilisé par qui le souhaite. Certains essaient d'appliquer la vieille notion de propriété à ces nouveaux objets que sont

les algorithmes, les programmes, les données... mais avec un succès limité, car la notion de propriété d'un objet est intrinsèquement liée à sa non-duplicabilité.

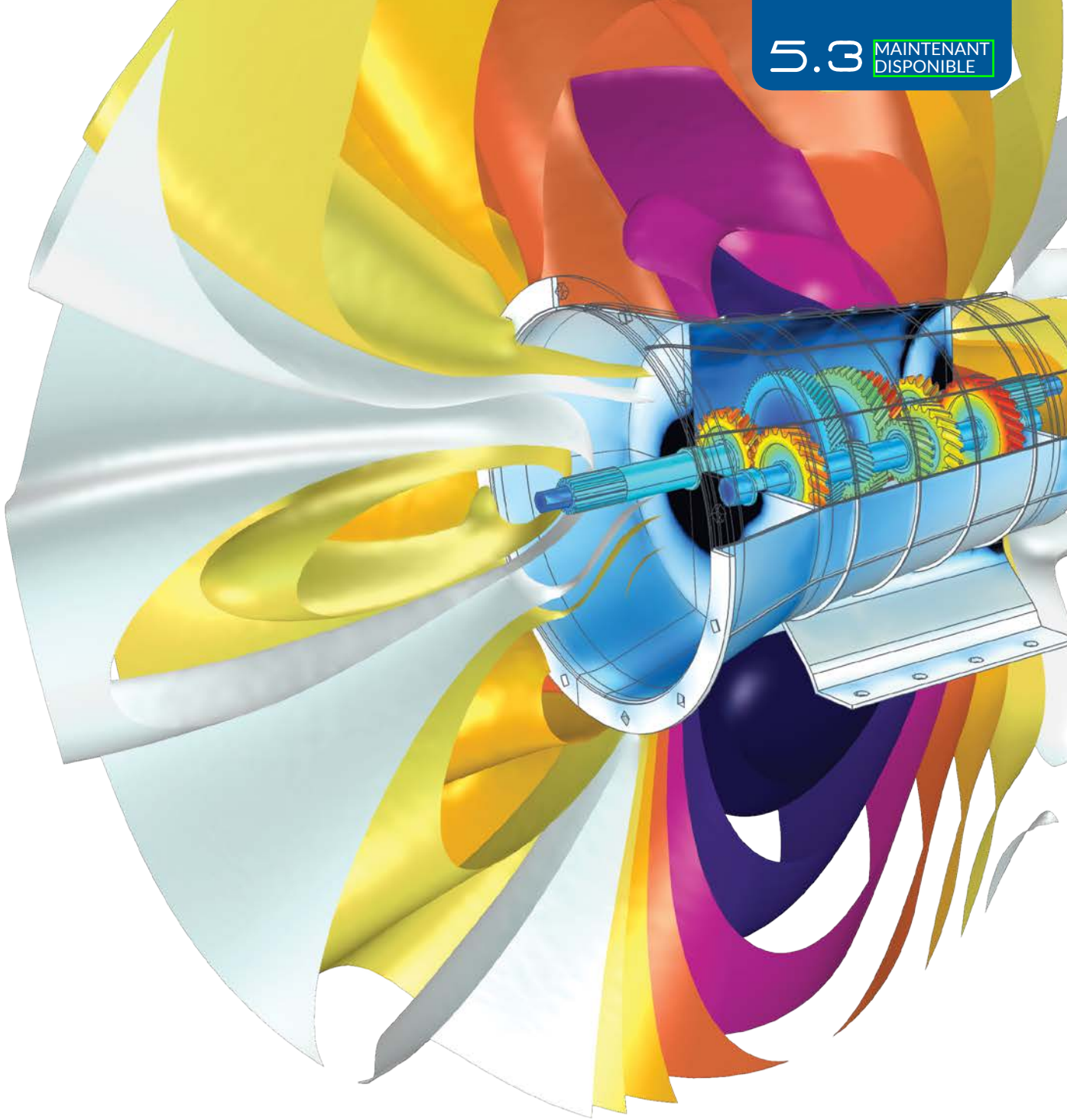
Une seconde raison est que, plus un programme a d'utilisateurs, plus il est amélioré, car chaque utilisateur peut participer à son développement. Mais, pour que cela puisse se faire, il faut que ses concepteurs acceptent de partager ce programme, c'est-à-dire, essentiellement, d'en abandonner la propriété.

À première vue, ce recul de la propriété ne concerne que des biens très particuliers : l'information est certes duplicable à coût nul, mais la matière et l'énergie ne le sont pas. Toutefois, les objets que nous fabriquons sont de plus en plus informationnels. Par exemple, un ordinateur, un moteur à explosion ou un bâtiment ne sont pas duplicables, mais le plan de l'ordinateur, du moteur ou du bâtiment – l'algorithme qui permet de les fabriquer – le sont. Si bien que nous pouvons être propriétaires d'un ordinateur, tout en ne l'étant pas de son plan. Même si elle ne disparaît pas, la propriété privée recule donc partout.

Ce qui est vrai de la propriété est également vrai du travail, plus gravement menacé par l'automatisation des services que par d'hypothétiques mouvements politiques influencés par la pensée de Paul Lafargue, auteur du *Droit à la Paresse*, ou de Bertrand Russell, auteur de *L'Éloge de l'oisiveté*.

Ainsi, dans l'expression « révolution informatique », il ne faut pas prendre le mot « révolution » trop au sens figuré : en mettant en péril la propriété privée, le travail, mais aussi, par exemple, les institutions, la révolution informatique est peut-être, littéralement, une révolution. Et les informaticiens qui construisent un monde sans propriété privée sont peut-être comparables aux saint-simoniens qui, pour favoriser l'association et la fraternité entre les hommes, construisaient des lignes de chemin de fer. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

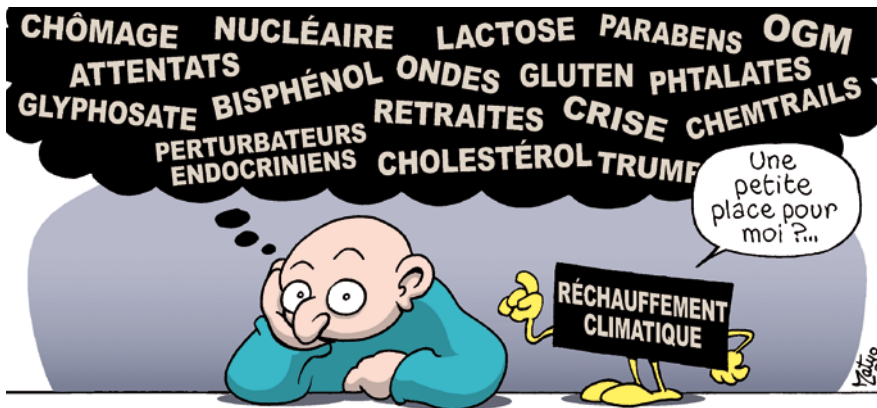
comsol.fr/products



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

CLIMAT: POURQUOI TANT D'INERTIE?

Si la question du changement climatique mobilise peu, c'est probablement parce que trop de dangers environnementaux sont mis en avant sans qu'on les ait hiérarchisés.



C'est une énigme persistante: alors qu'il y a un consensus scientifique sur la question du changement climatique et que le grand public en est plutôt bien informé, pourquoi cette prise de conscience ne se transforme-t-elle pas en mobilisation générale? Tous ceux qui ont travaillé sur les incitations savent combien il est naïf de parier sur la seule vertu pour parvenir à mobiliser les foules, mais on pourrait croire que la peur est un moteur suffisant pour créer un mouvement puisant dans l'opinion.

Cependant, en premier lieu, cette peur n'est pas si tangible qu'on pourrait le croire. Un rapport gouvernemental publié en 2017 indique que les enjeux climatiques ne font pas partie du trio de tête des craintes des Français, lesquels se déclarent plus préoccupés par le terrorisme, la précarité de l'emploi et les questions de santé.

Ensuite, les conséquences du désastre annoncé paraissent à certains situés dans un futur lointain et un peu irréel, de sorte que les coûts imaginés sont soumis à ce que Paul Samuelson appelait la

dépréciation temporelle de la valeur. La valeur d'une dette, expliquait cet économiste américain, a tendance à s'amenuiser psychologiquement à mesure qu'elle doit être honorée dans un lointain futur.

Enfin, la part de ce que chacun peut faire paraît marginale en termes de bénéfices escomptés par rapport aux efforts qui sont demandés. D'autant que les premiers effets catastrophiques de ce

Les rayonnages du supermarché de la peur sont trop bien garnis

réchauffement se situent dans des contrées exotiques, et l'on sait que notre compassion est affectée par les kilomètres qui nous séparent du lieu du drame.

Mais entre toutes les raisons que l'on a pu invoquer, il en est une qui me paraît fondamentale lorsqu'on s'interroge sur

la paralysie de l'action: celle d'avoir trop de choix. En effet, le marché cognitif est saturé par l'exhibition du risque (fondé ou infondé): les ondes, le nucléaire, le glyphosate, le gluten, le lactose, les OGM, les perturbateurs endocriniens... Les rayonnages du supermarché de la peur sont si bien fournis qu'ils peuvent conduire tout à la fois à retenir notre attention en permanence et à suspendre peu à peu notre capacité d'action.

Cette situation de paralysie de la décision humaine me paraît bien illustrée par une expérience que mentionne le psychologue allemand Gerd Gigerenzer dans son livre *Le Génie de l'intuition*. On installe dans une épicerie de luxe deux stands. Le premier propose 24 variétés exotiques de confiture tandis que le second n'en propose que 6. On constate alors que le stand le mieux garni retient plus facilement l'attention (60% contre 40%), mais il suscite moins d'actes d'achat. Lorsque 24 confitures sont présentées, seuls 3% de l'ensemble des clients en achètent un pot de plus. En revanche, si le choix est réduit à 6, le chiffre grimpe à 30%. Le plus grand choix attire donc davantage l'attention, mais ne favorise pas forcément la décision et l'action.

Pour que le cerveau humain puisse prendre une décision et ne soit pas frappé par ce que le psychologue américain Roy Baumeister nomme l'épuisement de l'ego, il lui faut percevoir un ordre de priorité. Or la mise en scène permanente des risques ne contribue pas à l'établissement d'une hiérarchie rationnelle. Ceux qui se préoccupent de questions environnementales ne favorisent pas toujours cette hiérarchie rationnelle des risques et contribuent souvent, involontairement, à la saturation de notre attention.

Nous sommes constamment sollicités par la mise en scène du risque et convaincus, à tort ou à raison, de vivre dans un environnement empoisonné. Mais cette arborescence envahissante des peurs ne nous rend pas nécessairement aptes à réagir lorsque se présente le vrai danger. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



cité

sciences
et industrie

en toutes intelligences

accès gratuit

septembre 2018
— janvier 2019

INFORMATIONS SUR CITE-SCIENCES.FR

conférence exceptionnelle

Dimanche 18 novembre à 15h

Le monde extraordinaire des émotions animales

« Le rire est le propre de l'Homme » écrivait Rabelais... Mais il n'avait pas encore vu de grand singe ! Peu à peu, on découvre en eux tout ce que l'on croyait jusqu'alors réservé à l'humain. Et récemment, les émotions : peur, colère, désir... La conclusion de travaux de recherche sur toutes les espèces est sans appel : aucune de ces émotions n'est propre à l'humain...

Avec **Frans de Waal**, primatologue et biologiste, professeur d'éthologie à l'université Emory d'Atlanta, États-Unis.



AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENCE**

EN PARTENARIAT AVEC

LLL
LES LIEUX COLLABORANTS



autres corps, autres intelligences

cycle de conférences

— les mardis à 19h

6 novembre

Le blob ou comment apprendre sans un seul neurone

Audrey Dussutour, chargée de recherche au CNRS, Centre de recherche sur la cognition animale, CNRS - université Toulouse III - Paul Sabatier.

13 novembre

Les plantes ou l'apprentissage sensible du monde

Jacques Tassin, chercheur en écologie végétale au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad).

20 novembre

La fourmi, intelligente, même seule !

Antoine Wystrach, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche sur la cognition animale, CNRS - université Toulouse III - Paul Sabatier.

27 novembre

Les poulpes, des cerveaux plein les bras

Ludovic Dickel, professeur des Universités, biologiste des comportements, UMR 6552 Éthologie animale et humaine, équipe neuro-éthologie cognitive des céphalopodes, CNRS universités de Rennes I et de Caen.

AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENCE**

OFFRE NOËL

DURÉE
LIBRE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
DÉCOUVERTEFORMULE
PAPIER
+
HORS-SÉRIEFORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier (12 numéros par an)

Le hors-série papier (4 numéros par an)

L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr

L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)

L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)

L'accès aux archives numériques depuis 1996

Votre cadeau : le livre *Le temps des algorithmes*
de Gilles Dowek & Serge Abiteboul (74651175)

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS6,50€
PAR MOIS8,20€
PAR MOIS41 %
de réduction *40 %
de réduction *48 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

PAG18NOE

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.
☐ **FORMULE
DÉCOUVERTE**
• 12 n° du magazine papier
4,90€
PAR MOIS
-41 %

DPV4E90K3

☐ **FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
6,50€
PAR MOIS
-40 %

PPV6E50K9

☐ **FORMULE
INTÉGRALE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
• Accès illimité aux contenus en ligne
8,20€
PAR MOIS
-48 %

IPV8E20K10

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

Reduction 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 31/03/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT
Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

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

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

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

CE QUI DISTINGUE SAPIENS DES AUTRES ANIMAUX

- P. 28** La culture, moteur de l'évolution humaine
- P. 36** Des pensées emboîtées... et partagées
- P. 42** Comment le langage s'est imposé
- P. 48** Un cerveau hors catégorie

Culture, langage, cognition...: l'espèce à laquelle nous appartenons est singulière, tout le monde en convient. Et cette singularité nous intrigue depuis toujours. De fait, d'innombrables penseurs ont tenté de définir ce qui fait le propre de l'homme. Avec hélas peu de résultats convaincants et durables face aux découvertes de l'éthologie. Néanmoins, les progrès de la science aidant, nous connaissons aujourd'hui mieux les différences essentielles entre les humains et les autres animaux, et nous comprenons mieux leurs origines. Avec ce dossier, *Pour la Science* vous propose un état des lieux des recherches et réflexions sur la question, à travers quatre éclairages complémentaires. Un état des lieux qui montre que, dans l'affaire, le fait culturel joue un rôle capital.

Pour la Science

La culture, moteur de l'évolution humaine

Si notre espèce brille par son intelligence et sa créativité, c'est parce que nous sommes avant tout des animaux sociaux. Langage, empathie, enseignement... : ces éléments qui facilitent les interactions sociales et le partage des connaissances auraient été autant de clés au succès évolutif d'*Homo sapiens*.

L'homme est-il un animal comme les autres ? Posez la question autour de vous, il y a toutes les chances qu'on vous réponde non. Il existe une croyance largement partagée parmi la population, mais dénuée de tout fondement rationnel, selon laquelle l'espèce humaine est unique en son genre, séparée du reste du monde animal. Curieusement, les scientifiques les mieux placés pour se prononcer sur la question se montrent souvent réticents à reconnaître l'originalité d'*Homo sapiens*, peut-être par crainte de placer l'être humain sur un piédestal comme le font beaucoup de religions. Pourtant, de l'écologie à la psychologie cognitive, les preuves s'accumulent pour affirmer que les humains sont véritablement une espèce à part.

Pour commencer, l'impact de notre espèce est mondial : elle s'est installée sous tous les climats et maîtrise les ressources en énergie et en matière. Quant à notre intelligence, notre don pour la communication, notre capacité à acquérir et à partager des connaissances, sans

parler des chefs-d'œuvre artistiques ou architecturaux que nous construisons, qui pourrait dire que cela ne fait pas d'*Homo sapiens* un animal particulier ?

Expliquer scientifiquement le développement de nos aptitudes cognitives et leur expression dans notre culture représente un défi. C'est ce que j'appelle « la symphonie inachevée de Darwin », pour la simple et bonne raison que Charles Darwin s'est attaqué à cette question il y a cent cinquante ans mais, comme il l'a lui-même confessé, sa compréhension du problème était « imparfaite » et « fragmentaire ». Heureusement, d'autres scientifiques ont repris le flambeau depuis et les chercheurs sont de plus nombreux à penser que nous nous approchons de la clé de l'énigme.

Le consensus qui émerge est que les exploits de l'humanité résultent de notre aptitude à acquérir des connaissances et des compétences d'autrui. Renforcée au fil des générations, cette expérience collective permet d'imaginer des solutions toujours plus efficaces et diversifiées. Être pourvu d'un gros cerveau, d'intelligence et du langage ne nous a pas amenés à la culture, »

La faculté de marcher dans les pas des autres, ou l'apprentissage social, a été une clé du succès d'*Homo sapiens*.

L'ESSENTIEL

> Les réalisations des humains découlent de leur capacité à acquérir du savoir d'autrui et à piocher dans le réservoir commun des expériences de chacun.

> *Homo sapiens* n'est pas la seule espèce capable d'invention. D'autres espèces, tels les chimpanzés ou les dauphins, innovent elles aussi.

> Mais la singularité des humains tient en partie à leur capacité d'imiter leurs semblables avec beaucoup de précision et de se transmettre le savoir de génération en génération.

> Cette culture accumulée serait elle-même un moteur de l'évolution de l'espèce humaine et de son cerveau.

L'AUTEUR



KEVIN LALAND
professeur
de biologie évolutive
et du comportement
à l'université St Andrews,
en Écosse



➤ C'est plutôt l'inverse qui s'est produit. La culture est le soubassement de nos facultés. Elle a orienté notre chemin le long de l'évolution.

Quand on parle de culture, on pense par exemple haute couture ou gastronomie, mais dans l'acception scientifique du terme, il s'agit de l'ensemble des comportements qui sont partagés par les membres d'une communauté et qui sont socialement transmis. Que l'on considère le design d'une voiture, des styles de musique à la mode, des théories scientifiques ou la quête de nourriture au sein de sociétés tribales, toutes ces « inventions » sont en réalité le résultat de petites incrémentations qui modifient des schémas préexistants. Imiter et innover sans cesse, tels sont les secrets de notre succès.

COMPARER AVEC LES APTITUDES DES ANIMAUX

Pour isoler le « propre de l'homme », il faut évidemment commencer par étudier les aptitudes des animaux. C'est en procédant ainsi que nous connaissons les qualités dans lesquelles nous excellons et celles, *a contrario*, que nous partageons avec d'autres espèces. Alors que nous apprend l'éthologie sur le terrain de l'apprentissage social et de l'innovation ? Que de nombreux animaux copient le comportement de leurs semblables. Ils emmagasinent ainsi des connaissances sur les plantes comestibles ou celles dont il faut se méfier, sur les façons d'éviter les prédateurs, sur les cris d'appel, les chants... Les traditions d'utilisation d'outils dans les populations de chimpanzés en Afrique sont un exemple célèbre. Au sein de chaque communauté, les jeunes singes apprennent certains comportements – qu'il s'agisse de casser des noix ouvertes en les frappant avec une pierre ou de pêcher des fourmis avec un bâton – en imitant des individus plus expérimentés.

Mais l'apprentissage social ne se limite pas aux primates, aux animaux à gros cerveau ou

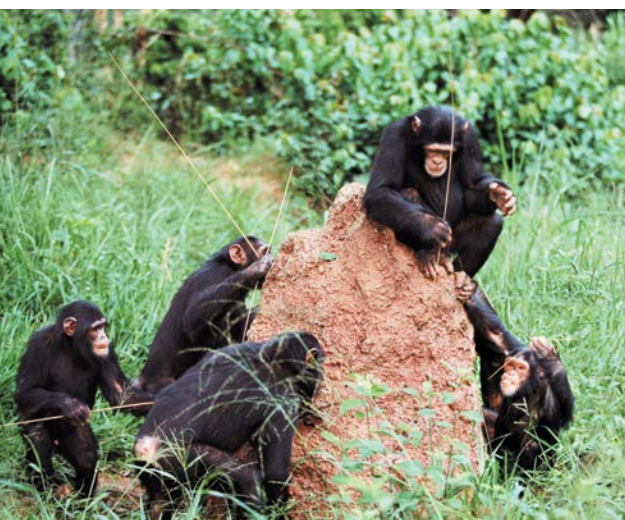
même aux vertébrés. Des milliers d'études expérimentales attestent de comportements d'imitation chez des centaines d'espèces de mammifères, d'oiseaux, de poissons et d'insectes. On a même constaté que les jeunes drosophiles femelles élisent comme partenaires les mêmes mâles que ceux qu'ont choisis des femelles plus âgées.

Les animaux apprennent au contact de leurs congénères divers types de comportement. Les dauphins se transmettent l'art de chasser à l'aide d'éponges de mer couvrant leur rostre, l'éponge leur servant à explorer les fonds marins sans se blesser. Les orques ont des traditions de chasse au phoque, l'une d'elles consistant à mener une charge contre les phoques montés sur la banquise et à les faire tomber en créant une grosse vague. Les poulets acquièrent même des habitudes cannibales en imitant d'autres poulets.

Les connaissances transmises socialement chez les animaux concernent essentiellement la nourriture – ce qu'il est possible de manger et où le trouver –, même s'il existe de curieuses exceptions. Au Costa Rica, un groupe de capucins a ainsi la singulière habitude d'insérer des doigts dans les orbites oculaires ou les narines de leur voisin ou de placer une main dans sa bouche, et de rester assis des heures durant dans cet appariement étrange, tout en se balançant doucement ; cette attitude aurait pour rôle de renforcer les liens sociaux.

Les animaux « innove » aussi. Si je vous demande de me citer une innovation, vous me parlerez peut-être de la pénicilline développée par Alexander Fleming ou du World Wide Web imaginé par Tim Berners-Lee. Les équivalents animaux sont tout aussi fascinants. Mon exemple favori concerne un jeune chimpanzé appelé Mike, que la primatologue Jane Goodall a observé faire s'entrechoquer avec force deux bidons d'essence vides. Le vacarme intimidait

Comme les humains, les chimpanzés savent se servir d'outils. Ils utilisent par exemple des tiges pour attraper des termites et savent enseigner leur technique à leur progéniture. Mais contrairement aux chimpanzés, les humains transmettent leur savoir culturel avec un haut degré de précision, ce qui leur permet de produire et d'utiliser des outils d'une grande complexité.



les autres mâles, ce qui a permis à Mike de gravir les échelons sociaux et de devenir un mâle dominant en un temps record. Au Japon, des corneilles se servent des voitures pour casser des noix. N'ayant pas assez de force pour fendre les coquilles avec leur bec, les oiseaux se sont mis à déposer les noix sur la chaussée en attendant que des véhicules les écrasent. Citons aussi les étourneaux de Fredericksburg, en Virginie, qui ont attaqué une machine à pièces dans une station de lavage de voitures et ont littéralement gagné des centaines de dollars en pièces (les étourneaux décoraient parfois leurs nids d'objets brillants récupérés ou chapardés).

LA CULTURE AURAIT FAIT GRANDIR LE CERVEAU

Loin d'être de simples anecdotes amusantes, de telles histoires illustrent le tableau général brossé par les analyses qui ont comparé les performances d'animaux. Le résultat majeur de ces recherches est que les espèces innovantes, ainsi que celles qui se comportent en «imitateurs», ont des cerveaux inhabituellement grands (tant en termes absolus que par rapport à la taille du corps). La corrélation entre les taux d'innovation et la taille du cerveau a d'abord été observée chez les oiseaux, puis chez les primates. Ces données étayaient une hypothèse connue sous le nom d'«entraînement culturel», proposée pour la première fois dans les années 1980 par le biochimiste Allan Wilson, de l'université de Californie à Berkeley.

Wilson a soutenu l'idée que la capacité à résoudre des problèmes ou à copier les innovations d'autrui confère aux individus un avantage pour survivre. À travers la sélection naturelle, ces aptitudes favoriseraient l'apparition de cerveaux de plus en plus volumineux – processus qui aurait culminé chez les humains, dotés d'un énorme cerveau, chef d'orchestre d'une créativité sans limites et d'une culture généraliste.

Au début, les scientifiques se sont montrés sceptiques vis-à-vis de la théorie de Wilson. Si la mouche du vinaigre, avec son cerveau minuscule, pouvait copier à la perfection, pourquoi la sélection naturelle aurait-elle encouragé le développement de cerveaux gigantesques chez les primates si l'enjeu était simplement d'imiter? L'objection a subsisté durant des années, jusqu'à ce qu'un argument provenant d'une source inattendue ne vienne la balayer.

En 2010, avec mes collègues de l'université St Andrews, en Écosse, nous avons organisé un tournoi d'apprentissage social. Il s'agissait d'une compétition pour désigner la meilleure façon d'apprendre dans un monde complexe et changeant. Même si le tournoi en présentait une version abstraite, le problème que les compétiteurs devaient résoudre sur ordinateur s'apparentait au dilemme que rencontre un joueur entrant

LES HUMAINS AUX YEUX D'UN EXTRATERRESTRE

Imaginez une intelligence extraterrestre qui observerait la Terre et essaierait de ranger les espèces en catégories. Nul doute qu'elle placerait les humains à part dans sa classification. En voici quelques raisons.

Taille de la population. La démographie humaine est sans commune mesure avec celle des autres vertébrés. Plusieurs ordres de grandeur séparent les 7 milliards d'humains des populations de vertébrés de même taille.

Extension territoriale. L'espèce humaine est présente dans presque tous les milieux naturels de la planète.

Maîtrise de l'environnement. Les humains contrôlent la production et le transport d'énergie et de matière à des échelles sans précédent.

Impact global. Les activités humaines menacent et entraînent l'extinction d'un nombre inégalé d'espèces, tout en provoquant de profonds changements évolutifs dans la biosphère.

Cognition, communication et intelligence. Les humains présentent des performances supérieures à divers tests d'apprentissage et de cognition. Le langage humain est d'une souplesse infinie, contrairement à la communication animale.

Acquisition et partage de connaissances. Les humains acquièrent, partagent et stockent des informations à des échelles inédites et innovent en s'appuyant sur des connaissances culturelles accumulées au fil des générations.

Technologie. Les humains inventent et fabriquent en masse des objets matériels infiniment plus complexes et divers que les autres animaux.

dans un casino empli de machines à sous. À quelle machine vais-je jouer? se demande-t-il, sachant que toutes les machines n'offrent pas la même espérance de gain. Une série de choix cruciaux s'offrent à lui: va-t-il tenter des machines au hasard, puis rester sur celle semblant la plus généreuse? À moins qu'il ne reporte à plus tard sa décision et commence par observer les gains remportés par les autres joueurs? Le choix de ses actions est décisif, car son argent comme son temps sont comptés.

Notre tournoi reposait sur une version de ce problème dans laquelle les espérances de gain des machines changeaient régulièrement afin de produire un environnement fluctuant, plus représentatif des écosystèmes réels. Tout ce qu'il était demandé aux participants, des professeurs d'université et des étudiants, était de préciser quelles règles de comportement allaient suivre leurs joueurs (appelés agents dans le programme) une fois entrés dans le casino (le jeu mettait en scène non pas un, mais cent agents), chaque comportement procurant un bénéfice spécifique qui évoluait au cours du temps. Le défi consistait à obtenir le maximum de gains. Les agents avaient le choix entre apprendre un nouveau comportement ou accomplir une action déjà connue, et l'apprentissage se déroulait par essais et erreurs ou par

copie de la conduite d'autres individus. Tous les ensembles de règles qui nous ont été soumis ont concouru entre eux dans une simulation informatique, et le meilleur a remporté un prix de 10000 euros.

Les résultats ont été très instructifs. Nous avons trouvé une forte corrélation entre la performance d'un ensemble de règles et les capacités d'apprentissage social dont faisaient preuve les agents. L'entrée gagnante n'exigeait pas des agents qu'ils apprennent souvent, mais lorsqu'ils le faisaient, c'était presque toujours en imitant (en copiant de manière précise et efficace le comportement d'un autre agent).

Le tournoi nous a indiqué une interprétation de la relation étroite entre apprentissage social et taille du cerveau chez les primates. Les résultats laissent penser que la sélection naturelle ne favorise pas l'apprentissage social en termes de quantité, mais de qualité. Les animaux ont besoin d'un gros cerveau non pas pour copier, mais pour bien copier.

Ce nouveau regard sur l'apprentissage a stimulé la recherche sur ce qui concrètement chez les espèces permettait l'imitation. Les chercheurs ont naturellement émis l'idée que la sélection naturelle devait favoriser les structures anatomiques ou les capacités fonctionnelles du cerveau des primates qui privilégient une copie précise et efficace. Par exemple, une meilleure perception visuelle permettrait de mieux copier un comportement à distance ou d'imiter des actions motrices minutieuses. En outre, la sélection devrait avantager une plus grande connectivité entre les aires motrices et perceptives du cerveau, car cela aiderait les individus à traduire en gestes les actions observées chez autrui.

La même hypothèse d'«entraînement culturel» (la culture guide l'évolution et non l'inverse) prévoyait aussi que la sélection de capacités accrues d'apprentissage social devait avoir influencé d'autres aspects du comportement social et de la vie des primates, notamment l'instinct social et l'usage d'outils. Le raisonnement était que plus le groupe est grand et plus le temps investi en société était important, plus les occasions d'apprendre se multiplient. En copiant leurs semblables, les singes acquièrent des compétences en matière de recherche de nourriture, de l'extraction de larves dans l'écorce des arbres jusqu'à des usages élaborés d'outils, comme lorsqu'ils attrapent des termites avec des bâtons.

Si l'apprentissage social facilite la recherche de nourriture, toutes les espèces compétentes en apprentissage social devraient se montrer expertes dans la quête de nourriture et le maniement d'outils. Elles devraient avoir un régime alimentaire plus riche et vivre plus longtemps, puisque cela leur laisserait d'autant plus de temps pour apprendre de nouvelles compétences et les transmettre à leurs descendants. En résumé, l'hypothèse de l'entraînement

culturel prédit que le niveau d'apprentissage social doit être corrélé non seulement à la taille du cerveau, mais aussi à une série de paramètres liés aux performances cognitives.

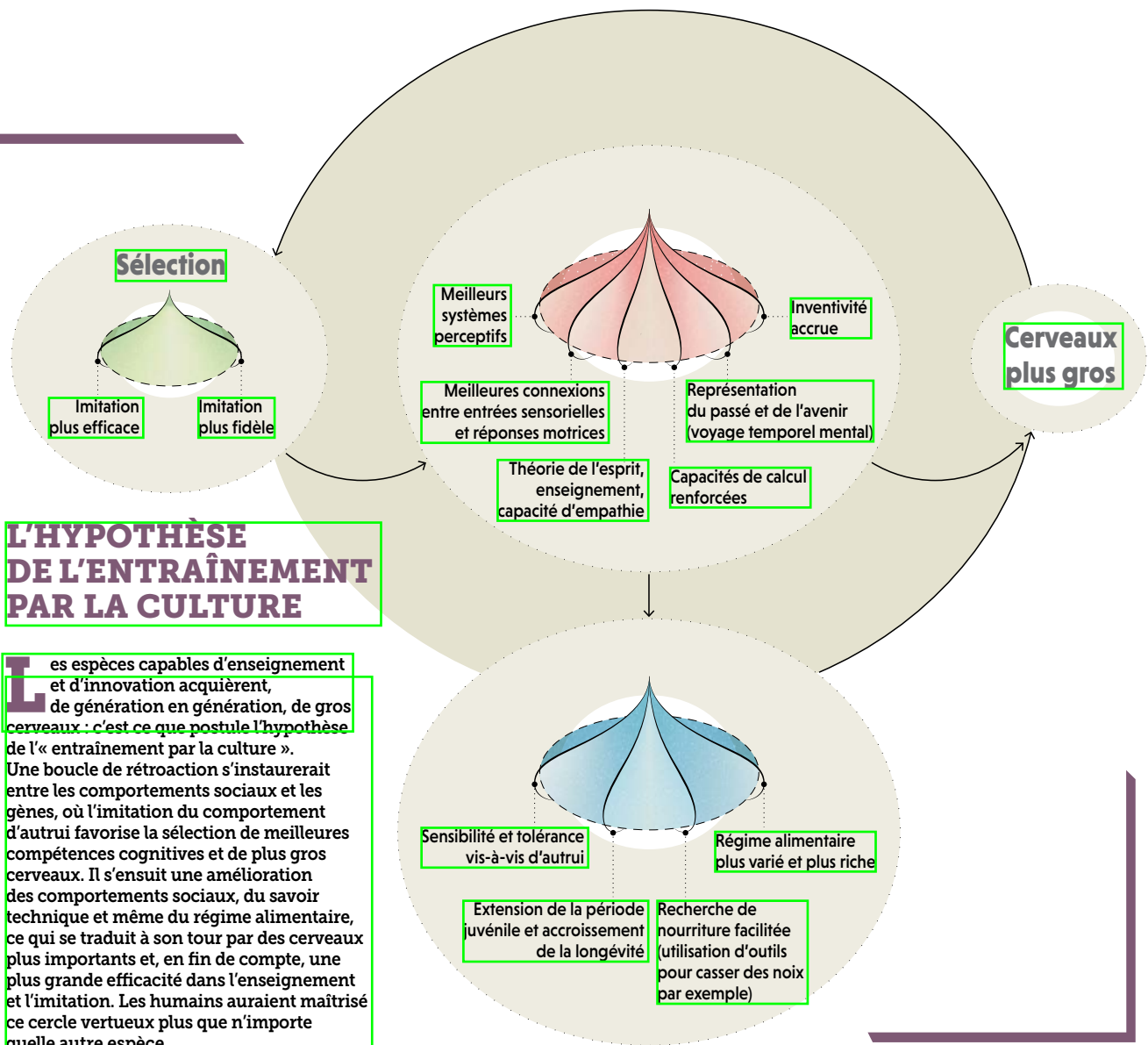
Des analyses comparatives rigoureuses ont confirmé ces prévisions. Les primates qui excellent en apprentissage social et en innovation ont le régime alimentaire le plus varié, utilisent des outils pour se nourrir, et présentent le comportement social le plus complexe. En fait, les analyses statistiques suggèrent même que l'ensemble de ces paramètres varient si étroitement les uns avec les autres que l'on peut aligner les primates le long d'une droite reflétant les performances cognitives générales, que nous appelons l'intelligence des primates (vaguement analogue au QI chez l'homme).

Les chimpanzés et les orangs-outans excellent dans ces mesures de performance et ont de ce point de vue une grande intelligence, tandis que des prosimiens (des primates jugés plus primitifs que les grands singes, les lémuriens en font partie) nocturnes sont à la peine. Selon une constatation faite par les neurobiologistes, les composants du cerveau sont représentatifs de la taille générale de l'organe. Dans

Les singes d'intelligence supérieure sont ceux ayant un apprentissage social et des traditions culturelles

les cerveaux des grands primates, les régions qui exercent le contrôle des actions (situées dans le néocortex et le cervelet) et se projettent vers les neurones moteurs des membres sont plus grandes et mieux connectées entre elles, ce qui facilite les mouvements précis. Cela nous aide à comprendre pourquoi les animaux à gros cerveau présentent une cognition complexe et utilisent des outils.

Chez quelles espèces de primates l'évolution a-t-elle sélectionné une intelligence supérieure? Chez quatre groupes distincts: les capucins, les macaques, les babouins et les grands singes – précisément les espèces connues pour leur apprentissage social et leurs



traditions culturelles. Cette corrélation est exactement ce à quoi il faut s'attendre si les processus culturels pilotent vraiment l'évolution du cerveau et de la cognition. Des analyses supplémentaires, utilisant des données plus précises et des méthodes statistiques de pointe, ont renforcé cette conclusion, tout comme les modèles qui prédisent quantitativement la taille du cerveau et du corps à partir de l'estimation des coûts métaboliques du cerveau.

L'entraînement culturel n'est pas l'unique moteur de l'évolution du cerveau : le régime alimentaire et l'instinct social jouent aussi un rôle important, car les singes qui mangent des fruits et ceux vivant dans de grands groupes complexes ont de gros cerveaux. Il est cependant difficile de ne pas conclure qu'une intelligence supérieure et une vie plus longue ont coévolué chez certains primates parce que leurs aptitudes culturelles leur permettaient d'exploiter des ressources alimentaires de qualité mais difficiles d'accès, les nutriments ainsi glanés contribuant à la croissance du cerveau. Les cerveaux sont des organes énergétiquement coûteux, et

l'apprentissage social est d'une importance primordiale pour tout animal cherchant à assurer l'apport correspondant en calories.

Pourquoi alors aucun autre primate n'a-t-il une culture aussi complexe que la nôtre ? Pourquoi les chimpanzés n'ont-ils pas séquencé des génomes ou construit des fusées ? La clé réside dans la fidélité de la transmission d'informations.

L'ENSEIGNEMENT EST CRUCIAL

La taille et la durée de vie du répertoire culturel que se partage une population augmentent de manière exponentielle avec la qualité de l'apprentissage. Sans transmission précise, il ne peut y avoir de culture cumulative. Mais une fois qu'un seuil est dépassé, même des quantités modestes d'innovations et d'amélioration des comportements entraînent un changement culturel massif. Les humains sont la seule espèce à avoir franchi ce seuil.

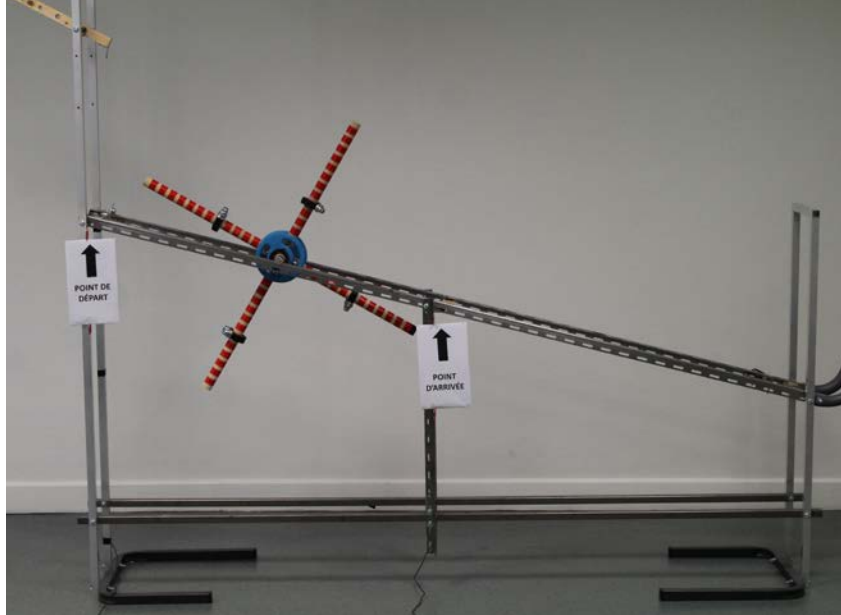
Nos ancêtres l'ont atteint grâce à l'enseignement. Tandis que l'imitation est une faculté largement répandue dans la nature, celle >

L'ESPÈCE HUMAINE EST INTELLIGENTE, PAS LES INDIVIDUS

Aux quatre coins du globe, les populations humaines exploitent des technologies remarquablement complexes et efficaces. Prenez les nomades des steppes d'Asie centrale. Ces populations chassent à l'aide d'arcs recourbés très courts (pour être maniés depuis un cheval) qu'elles produisent à partir de matériaux naturels (bois, corne, colle d'origine animale...). Fabriquer un arc à la fois maniable, robuste et efficace à partir de ces seuls composants constitue un défi d'ingénierie.

Il est généralement admis que notre remarquable capacité à produire des technologies complexes témoigne de l'intelligence de notre espèce : armés de nos imposants cerveaux, nous sommes individuellement plus ingénieux et plus inventifs que les membres des autres espèces.

Cette vision, qui met en avant la seule force de notre intellect, est aujourd'hui de plus en plus remise en cause. Selon les anthropologues évolutionnistes, les technologies complexes résulteraient en fait non pas de notre intelligence mais de notre propension à copier les autres membres de notre groupe. Ainsi, l'arc recourbé n'aurait pas été inventé par un individu particulièrement inspiré ou persévérant, mais aurait été le fruit de copies successives où chaque génération de chasseurs aurait reproduit l'arc le plus efficace. Au cours du temps, l'accumulation de petites améliorations conduirait à l'émergence de technologies complexes et pourtant incomprises par les individus.



Les participants à l'expérience de Maxime Derex et ses collègues devaient optimiser une roue en modifiant la position de quatre poids. La solution optimale consiste à placer les poids au plus près de l'axe de la roue, à l'exception du poids du haut. Cette configuration permettait de réduire la résistance à la mise en rotation de la roue tout en lui conférant une bonne accélération.

Mes collègues et moi avons récemment voulu tester cette théorie en laboratoire. Pour ce faire, nous avons demandé à des groupes de participants d'optimiser une roue de façon à ce qu'elle parcoure 1 mètre, sur des rails inclinés, le plus rapidement possible. Chaque individu pouvait modifier sa roue et disposait de cinq essais pour produire la configuration la plus efficace. Afin de simuler la succession des générations humaines, les deux derniers essais de chaque participant étaient

des participants ! Chaque individu avait produit des configurations plus ou moins aléatoires et la combinaison de ce processus individuel par tâtonnements et la copie des configurations les plus rapides avait suffi à rendre optimales les roues.

Cette expérience illustre l'importance des processus culturels : notre aptitude à copier et à apprendre des autres individus permet de faire émerger des technologies que nul n'aurait su inventer de lui-même. La reconnaissance des processus culturels dans l'évolution humaine apporte un éclairage nouveau sur les raisons de notre succès évolutif. Notre cognition est certes exceptionnelle, mais c'est bien notre culture qui fait de nous une espèce à part.

L'un des enjeux, à présent, est de déterminer l'étendue des effets de la culture sur notre cognition. Selon certains chercheurs, nos capacités cognitives elles-mêmes seraient une conséquence de l'évolution culturelle. De sorte que notre tendance à apprendre les uns des autres aurait non seulement produit de nouvelles façons de chasser, mais également de nouvelles façons de penser.

MAXIME DEREK

chercheur à l'université catholique de Lille et à l'université d'Exeter, au Royaume-Uni

Notre cognition est certes exceptionnelle, mais c'est bien notre culture qui fait de nous une espèce à part

transmis au participant suivant, dans des chaînes de cinq individus. À la fin des cinq essais, chaque participant devait répondre à une série de questions qui testaient sa compréhension des mécanismes physiques pouvant influencer sur la vitesse de la roue.

Nos résultats ont montré que la roue gagnait en vitesse à travers les générations, tandis que la compréhension des mécanismes restait médiocre tout au long de l'expérience. En d'autres termes, il n'y avait aucun lien entre la performance de la roue et l'intelligence

M. Derex et al., Causal understanding is not necessary for the improvement of culturally evolving technology, prépublication PsyArXiv (doi: 10.31234/osf.io/nm5sh), 2018

> d'enseigner est rare. Elle est en revanche universelle dans les sociétés humaines, une fois prises en compte toutes les formes subtiles qu'elle peut prendre. Des modélisations mathématiques ont montré que l'enseignement et la culture cumulative ont coévolué chez nos ancêtres. Dans l'histoire de la vie, c'était la première fois que les membres d'une espèce enseignaient une grande variété de compétences à d'autres membres.

Le savoir que se transmettaient les hominins (les humains et les genres éteints apparentés) portait sur la recherche de nourriture, la transformation des aliments, les cris d'alerte ou d'appel, la fabrication d'outils, etc., et a fourni le terreau sur lequel le langage est apparu. Pourquoi nos ancêtres se sont-ils mis à parler ? C'est l'une des grandes énigmes de la science. Une possibilité est que le langage ait servi à réduire les coûts, à améliorer la précision et à étendre les domaines de l'enseignement. Le langage humain est peut-être unique parce que les humains ont été les seuls à construire une société culturelle suffisamment diverse et dynamique pour qu'il y ait matière à jaser.

L'histoire du langage a commencé par une série de symboles partagés parmi les hommes. Mais une fois lancé, l'usage d'un protolangage a imposé une sélection sur le cerveau des hominins en faveur du cerveau le plus apte à apprendre, mais aussi sur le langage lui-même en faveur des structures linguistiques les plus faciles à maîtriser. Que les activités culturelles de nos ancêtres aient fait peser une pression de sélection sur leurs corps et leurs esprits – un processus de coévolution gène-culture – est maintenant bien étayé. Des analyses théoriques, anthropologiques et génomiques concordent pour indiquer que le savoir transmis socialement, notamment celui permettant la fabrication et l'usage d'outils, a engendré en retour une sélection naturelle qui a transformé l'anatomie et la cognition. Cette influence mutuelle des gènes et de la culture a été le creuset dans lequel la psychologie humaine moderne s'est forgée, avec tout ce qu'elle renferme de curiosité, d'envie d'apprendre, d'imiter, de partager les objectifs et les intentions des autres. Elle a aussi conféré aux humains des aptitudes à l'apprentissage et au calcul.

L'enseignement et le langage ont complètement rebattu les cartes pour notre lignée. La coopération à grande échelle est apparue dans les sociétés humaines grâce à nos facultés uniques d'apprentissage social et d'enseignement, comme l'attestent les données théoriques et expérimentales. La culture a entraîné les populations humaines vers de nouvelles voies évolutives, parce qu'elle a créé les conditions propices à la mise en place de mécanismes de coopération déjà présents chez d'autres animaux et d'autres totalement inédits. En particulier, elle

a permis l'émergence d'interactions et d'associations au niveau d'un groupe entier d'individus pour s'entraider ou rivaliser avec un autre groupe (afin par exemple de construire un système d'irrigation ou de former une armée).

A chaque fois qu'une innovation apparaissait chez nos ancêtres, ceux-ci étaient en mesure d'exploiter avec plus d'efficacité leur environnement. Ce perfectionnement a été le moteur de l'augmentation de la taille du cerveau comme celui de l'essor démographique. L'accroissement des effectifs humains et la complexité sociétale ont suivi la domestication des animaux et des plantes. L'agriculture a libéré les sociétés des contraintes inhérentes à la vie nomade des chasseurs-cueilleurs, contraintes qui limitaient la taille de leurs groupes et leur propension à innover. Les sociétés ont alors prospéré, à la fois parce que l'agriculture offrait des capacités supérieures de production alimentaire et parce qu'elle a entraîné dans son sillage tout un lot d'innovations techniques (la charrue ou les techniques d'irrigation, notamment) et sociétales (cités-États, religions...). En outre, dans les sociétés toujours plus grandes, le bénéfice tiré d'une invention avait plus de chances de se diffuser parmi la population et d'être retenu.

DES ÊTRES QUI SONT EN PARTIE LE PRODUIT D'EUX-MÊMES

En résumé, les recherches sur l'évolution cognitive humaine nous dépeignent comme des êtres qui sont en partie le produit d'eux-mêmes. Nous avons tendance à voir l'évolution comme un processus dans lequel des modifications exogènes de l'environnement, telles que l'apparition de prédateurs, de maladies ou des bouleversements climatiques, déclenchent des adaptations évolutives dans les traits des individus. Pourtant, l'esprit humain n'a pas évolué en suivant cette voie.

Non, nos aptitudes mentales ont plutôt été le fruit de processus en boucle au cours desquels nos ancêtres investissaient constamment de nouvelles niches (des aspects de leurs environnements physique et social) qui, en retour, imposaient une sélection sur leur corps et leur esprit, dans une série de cycles sans fin. Les scientifiques voient maintenant la séparation entre les humains et les autres primates comme le résultat de nombreux mécanismes de rétroaction survenus dans la lignée des hominins. À la façon d'une réaction chimique qui s'autoentretient, un processus de fuite en avant a conduit à l'essor de la cognition et de la culture humaines. L'espèce humaine est peut-être l'un des millions de rameaux que porte l'arbre de la vie. Mais notre capacité à penser, à apprendre et à contrôler notre environnement nous rend vraiment uniques et différents de tous les autres animaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Heinrich, *The Secret of Our Success : How Culture is Driving Human Evolution, Domesticating Our Species, and Making Us Smarter*, Princeton University Press, 2015.

L'odyssée humaine - Les moteurs cachés de notre évolution, *Pour la Science*, numéro spécial (n° 445), novembre 2014.

L. G. Dean et al., *Identification of the social and cognitive processes underlying human cumulative culture*, *Science*, vol. 335, pp. 1114-1118, 2012.

L. Rendell et al., *Why copy others ? Insights from the social learning strategies tournament*, *Science*, vol. 328, pp. 208-213, 2010.

S. M. Reader et K. N. Laland, *Social intelligence, innovation, and enhanced brain size in primates*, *PNAS*, vol. 99(7), pp. 4436-4441, 2002.

L'ESSENTIEL

> Mettre en évidence expérimentalement le fossé qui sépare les pensées humaine et animale est une tâche plus complexe qu'il n'y paraît.

> Les recherches ont toutefois mis en relief deux distinctions majeures : notre capacité à imaginer des scénarios imbriqués et le partage de pensées avec autrui.

> Réunies, ces aptitudes sous-tendent des facultés humaines primordiales telles que le langage, la culture, la moralité, l'anticipation du futur, la capacité à lire dans les pensées des autres.

L'AUTEUR



THOMAS SUDDENDORF
professeur
de psychologie
à l'université
du Queensland,
en Australie

Des pensées emboîtées... et partagées

Notre capacité à imaginer des scénarios emboîtés à la façon de poupées russes, et le besoin impérieux de partager nos pensées : voilà, selon Thomas Suddendorf, ce qui nous distinguerait des animaux sur le plan mental. Et qui expliquerait notre faculté à anticiper les situations futures.

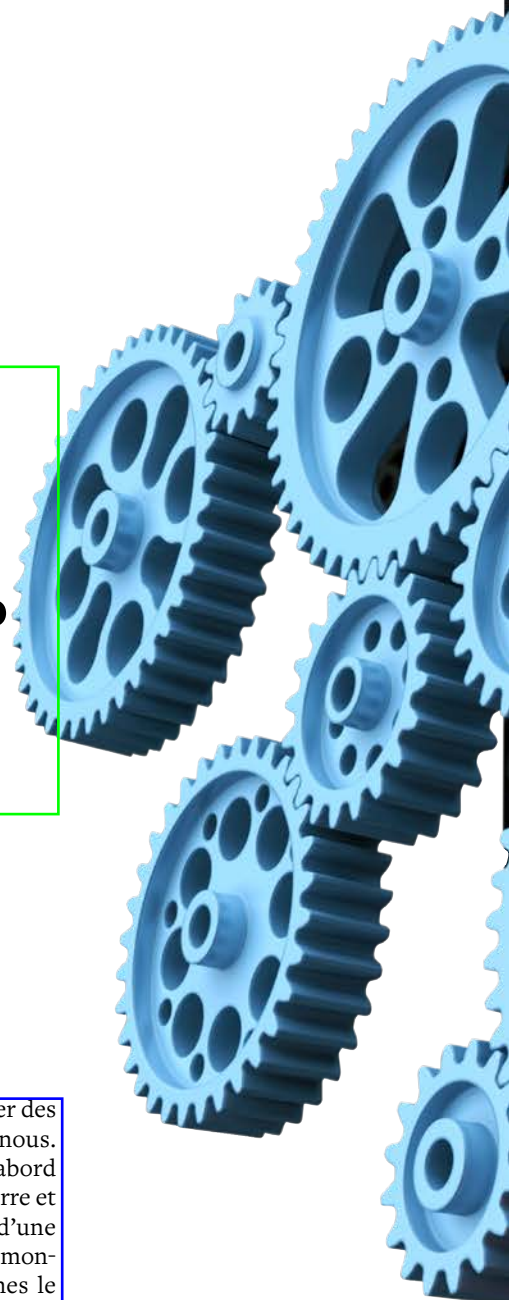
Pourquoi est-ce nous qui dirigeons les zoos, et non les gorilles ? Au cours des dernières centaines de milliers d'années, pendant que d'autres grands primates vivaient discrètement au cœur des forêts tropicales, les humains ont conquis la planète. Certains animaux sont pourtant plus puissants, plus rapides que nous et dotés de sens plus développés. Alors, qu'est-ce qui nous a permis d'asseoir notre domination ?

La réponse est : nos capacités mentales. Mais identifier les traits qui nous rendent si spéciaux s'est révélé fort difficile pour les scientifiques, d'autant que les recherches récentes ont montré que beaucoup d'animaux, des oiseaux jusqu'aux chimpanzés, ont certaines capacités cognitives qui rivalisent avec les nôtres.

L'année dernière, pour ne citer qu'un exemple, une étude publiée par Mathias Osvath et Can Kabadayi, de l'université de Lund, en Suède, affirmait avec audace que les grands

corbeaux (*Corvus corax*) peuvent planifier des actions à l'avance au même titre que nous. Dans l'expérience étudiée, on avait d'abord appris à cinq volatiles à ramasser une pierre et à la jeter dans une boîte en échange d'une récompense. Par la suite, les corbeaux se montraient capables de récupérer eux-mêmes le caillou, caché au milieu d'un tas d'autres objets, plusieurs minutes et même des heures avant que la boîte ne soit mise à leur disposition. Les chercheurs ont conclu que les corbeaux pouvaient se projeter dans l'avenir.

Toutefois, il est possible d'expliquer de façon plus simple ce succès, ainsi que les prouesses cognitives des grands singes que des chercheurs pensent avoir démontrées. Il apparaît aussi que les cognitions humaines et animales, quoique similaires à bien des égards, divergent radicalement sur deux points. Le premier est notre capacité à élaborer mentalement des scénarios, cette sorte de théâtre intérieur qui nous permet d'envisager et de manipuler de nombreuses situations possibles et d'anticiper leurs issues. Le





second est notre propension à échanger nos pensées avec les autres. Conjuguées, ces deux caractéristiques ont transformé l'esprit humain et ont fait de nous les conquérants du monde.

Commençons par examiner de plus près l'expérience des corbeaux. Avant même que les tests ne commencent, les oiseaux avaient appris, au cours de plusieurs essais, à reconnaître que la pierre donnait lieu à une récompense, contrairement aux autres objets placés autour. Il n'est donc pas vraiment surprenant que, lorsque les vrais tests ont commencé (ceux où la récompense était différée), les corbeaux aient manifesté un comportement qui avait déjà été renforcé.

LIMITER LES RISQUES D'INTERPRÉTATION ERRONÉE

Voilà le genre d'exemple qui me fait penser qu'avant de tirer des conclusions sur les prétendues capacités mentales élaborées des animaux, les scientifiques devraient envisager des explications plus simples. Ils devraient aussi reproduire plus souvent les expériences des autres équipes. Dans mon laboratoire, nous avons mené en 2011 une étude avec des enfants qui tentait de limiter tout risque d'interprétation erronée. D'abord, les tests n'étaient réalisés qu'une fois sur chaque enfant, pour éviter tout effet d'apprentissage. Nous avons aussi modifié la chronologie et les repères spatiaux du test pour éviter de fournir aux enfants des indices sur la solution, et nous avons élaboré les problèmes de telle façon qu'ils sollicitent des compétences variées, afin d'atténuer les effets d'une éventuelle prédisposition innée chez le sujet testé.

Par exemple, nous avons montré aux enfants une boîte contenant des autocollants dont l'ouverture se déclenchait par un objet de forme géométrique (triangulaire ou en croix). Ensuite, nous avons emmené les enfants dans une autre pièce où nous les avons distracts avec des jeux sans rapport avec l'expérience. Un quart d'heure plus tard, nous leur avons demandé de choisir l'un des objets qui les entouraient et de revenir dans la première salle. Les enfants de 3 ans ont choisi au hasard, mais ceux de 4 ans ont eu tendance à sélectionner l'objet ayant la forme qui pourrait plus tard les aider à actionner la serrure.

Nous avons utilisé ce paradigme de base pour évaluer la capacité des enfants à se perfectionner de façon délibérée. Par exemple, ils ont eu l'occasion de s'entraîner à une version simple du bilboquet, dans laquelle on attrape une balle fixée au bout d'une corde avec une tasse, en prévision d'un retour dans la première salle, où ils pouvaient ensuite obtenir une récompense pour la réussite d'une tâche similaire. Nous avons découvert que les enfants pouvaient intentionnellement façonner leurs

propres capacités futures à partir de l'âge de 4 ou 5 ans, mais pas avant.

Ces tâches sont conçues pour montrer les capacités de base dans des domaines tels que l'anticipation du futur, mais n'indiquent pas les limites supérieures de ces aptitudes. Par exemple, quand mon fils avait 4 ans, je l'ai soumis à l'un de ces tests. Il l'a réussi et alors que nous étions rentrés à la maison et installés sur son lit, il m'a dit: «Papa, je ne veux pas que tu meures.» Quand je lui ai demandé pourquoi cette pensée lui était venue, il m'a dit qu'il allait grandir et que je finirais par devenir grand-père et qu'ensuite je mourrais. Il démontrait ainsi une étonnante capacité à anticiper l'avenir que notre étude n'avait pas mise en relief.

Faute de reposer sur des critères rigoureux, ni l'étude sur les corbeaux ni aucune autre portant sur des animaux n'ont réussi à démontrer une aptitude à se projeter dans le futur; pas davantage un comportement d'entraînement délibéré. Devons-nous conclure que les animaux en sont incapables? Répondre par l'affirmative serait prématuré. L'absence de preuve ne constitue pas une preuve d'absence, comme dit le dicton. Mettre en évidence une compétence chez les animaux n'est pas une chose aisée; établir l'absence de compétence est encore plus difficile.

Considérons par exemple l'étude suivante, parue en 2016, dans laquelle mon collègue à l'université du Queensland, en Australie, Jon Redshaw, et moi avons essayé d'évaluer l'un des aspects psychologiques de l'avenir: la reconnaissance qu'il est largement incertain. Lorsqu'on

Aucune étude sur des animaux n'a démontré une aptitude à se projeter dans le futur

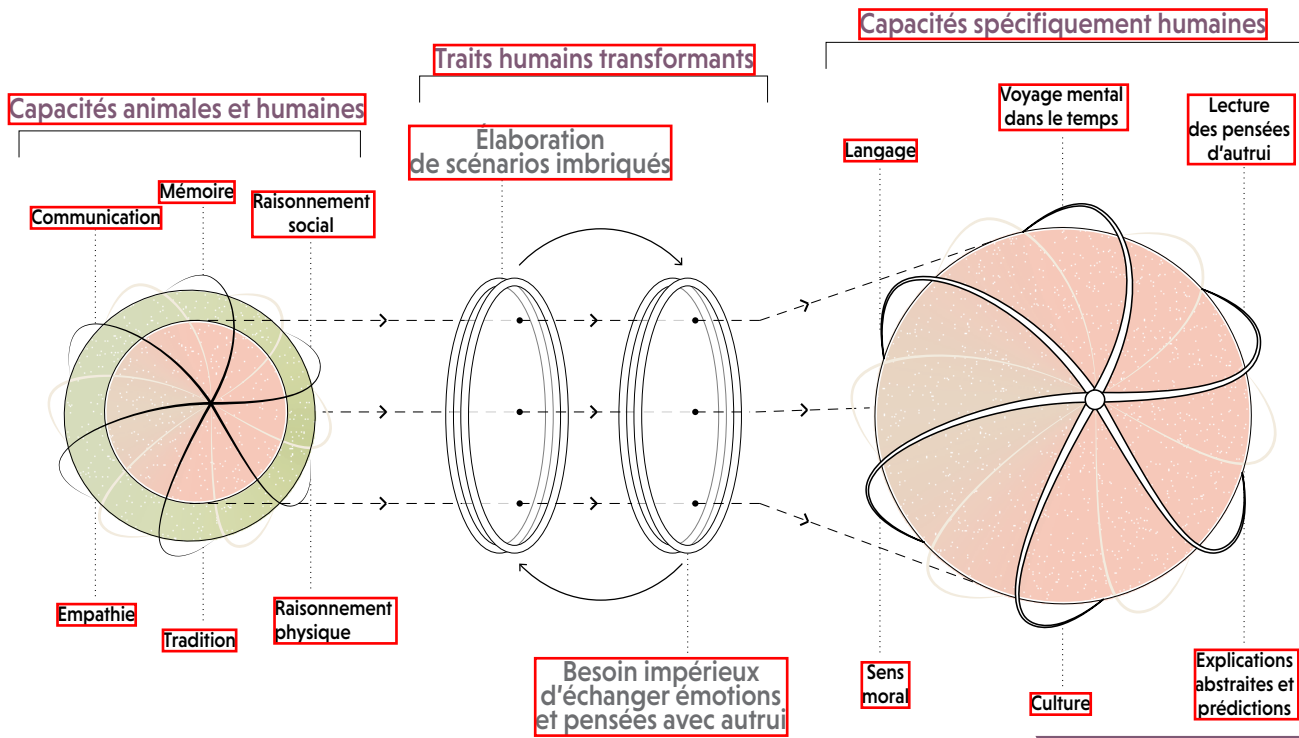
se rend compte que les événements peuvent se dérouler de plusieurs façons, il est logique de se préparer aux issues possibles et d'imaginer des plans de repli. Quand un chasseur tente de capturer une proie, il place des pièges devant toutes les voies d'évasion et pas seulement devant une seule. Nous avons voulu savoir si les chimpanzés et les orangs-outans manifestaient ce bon sens. L'expérience a consisté à montrer à des chimpanzés et des orangs-outans un tube vertical et

DEUX TRAITS COGNITIFS QUI ONT TOUT CHANGÉ

Les recherches en psychologie comparée ont identifié plusieurs capacités cognitives communes aux animaux et aux humains dans des domaines tels que la communication, la mémoire, l'analyse de l'environnement social et physique, les traditions, l'empathie. Mais deux caractéristiques spécifiquement humaines ont aidé à transformer ces

capacités en aptitudes mentales qui font de nous des animaux à part. La première, l'élaboration de scénarios imbriqués, nous permet de prospecter l'avenir en imaginant des situations alternatives fondées sur des raisonnements du type « et s'il se passait cela... ». La seconde est notre désir de partager nos émotions et nos pensées, ce qui permet

de réaliser des choses allant bien au-delà des capacités d'un individu. Ces deux traits se renforcent mutuellement et ont modifié notre psychologie. Ils ont mené au langage, au voyage mental dans le temps, à la moralité, à la culture, à notre capacité à lire dans les pensées d'autrui, à celle de comprendre le monde qui nous entoure...



à déposer une récompense au sommet en espérant qu'ils sauraient l'attraper au fond. Nous avons comparé les performances des singes à celles d'un groupe d'enfants âgés de deux à quatre ans. Les deux groupes ont facilement anticipé que la récompense réapparaîtrait au bas du tube: ils ont placé leur main sous la sortie pour se préparer à la prise.

Nous avons ensuite rendu les événements un peu plus difficiles à prédire. Le tube droit a été remplacé par un autre en Y renversé qui comptait deux sorties. En prévision de la chute, les singes et les enfants de 2 ans avaient tendance à ne couvrir qu'une seule issue. En revanche, les enfants de 4 ans plaçaient immédiatement et de façon systématique leurs mains sous les deux sorties, ce qui dénotait chez eux une capacité à prévoir deux versions exclusives d'un événement se déroulant dans un futur proche. Pour des enfants ayant entre 2 et 4 ans, nous observons une augmentation de la fréquence de cette planification alternative. Nous n'avons pas été témoins d'une telle capacité chez les singes.

Cette expérience ne prouve pas cependant que les grands singes et les enfants de 2 ans ne comprennent pas que le futur peut se dérouler de manière distincte. Comme je l'ai mentionné, il existe un problème fondamental lorsqu'il s'agit de démontrer l'absence de capacité. Peut-être que les animaux n'étaient pas motivés, ne comprenaient pas le principe de la tâche ou ne parvenaient pas à coordonner leurs deux mains. Ou peut-être, plus simplement, n'avons-nous pas testé les bons individus et que des animaux plus compétents auraient passé le test. Les débats entre interprétations riches et simples du comportement des animaux, associés à ce problème fondamental consistant à prouver qu'une capacité est toujours manquante, ont rendu difficile la recherche du propre de l'homme.

Difficile, mais pas impossible. Dans mon livre *The Gap: The Science of What Separates Us from Other Animals* («Le fossé: la science qui nous distingue des autres animaux», non traduit en français), je passe en revue les capacités cognitives classiquement attribuées aux humains mais

qui existent aussi chez les animaux, et qui les rendent plus intelligents qu'on ne le pense. Par exemple, les chimpanzés peuvent résoudre des problèmes en réfléchissant, se consolent les uns les autres dans les moments de détresse et maintiennent des traditions sociales. Néanmoins, l'humain se distingue par son langage, sa capacité à anticiper l'avenir, son intelligence, sa culture et sa moralité, et l'aptitude à imaginer les pensées d'un autre individu.

DES MONDES DANS D'AUTRES MONDES

Dans chacun de ces domaines, deux caractéristiques sous-jacentes continuent de séparer l'homme de l'animal. L'une est ce que j'appelle la « construction de scénarios imbriqués », c'est-à-dire notre capacité à imaginer des situations alternatives, à y réfléchir et à les intégrer dans des scénarios plus larges d'événements reliés. L'autre est « le désir de se connecter », une pulsion profondément ancrée qui nous pousse à échanger nos pensées avec autrui.

La construction de scénarios imbriqués nous permet d'imaginer des situations vécues par d'autres, d'évaluer des dilemmes moraux ou d'expérimenter des histoires entièrement fictives. Par la force du mental, nous pouvons vivre à l'avance d'éventuels événements futurs, réfléchir aux possibilités et les intégrer dans des histoires plus globales. Grâce à ce jeu de l'esprit, nous pouvons planifier et nous préparer aux occasions favorables et aux menaces avant qu'elles ne se matérialisent.

D'autres animaux sont sensibles aux régularités à long terme, telles que les rythmes jour-nuit, et beaucoup peuvent également s'adapter à des modifications locales de leur environnement. Par simple association, les animaux peuvent prévoir qu'une récompense ou une punition surviendra après un événement particulier. Mais nous, humains, pouvons envisager mentalement des situations, et même des scénarios entièrement nouveaux, sans que cela ait été déclenché par un stimulus extérieur. Un simple exemple : imaginez-vous marcher les yeux clos en pleine rue. Vous comprendrez que cette situation est dangereuse même si vous ne l'avez pas vécue. La construction de scénarios imbriqués repose sur une multitude de capacités élaborées fonctionnant de concert, dont l'imagination, la mémoire, la réflexion et la prise de décision.

On peut voir les scénarios imbriqués comme un théâtre interne dans lequel nous donnons vie à des situations. À l'instar d'une pièce, l'élaboration de scénarios repose sur certains ingrédients qui doivent être réunis. Il y a la « scène » mentale sur laquelle se déroulent les événements fictifs. Contribuent également les « acteurs » et le « décor », autrement dit les individus et les objets qui s'associent dans

l'histoire. Enfin sont invoquées des capacités similaires à celles d'un « metteur en scène », qui évalue et gère les scènes, et celles d'un « producteur », qui prend les décisions finales quant à la marche à suivre. Ces ingrédients correspondent à des concepts psychologiques tels que la mémoire de travail, la pensée récursive (la faculté de penser qu'on est en train de penser) et les fonctions exécutives (l'ensemble de processus cognitifs de haut niveau qui nous permet de prendre des décisions), des propriétés qui se développent à des rythmes différents au cours de l'enfance. Par conséquent, notre capacité d'anticipation de l'avenir s'épanouit à

Tout ce que les humains ont accompli de grandiose provient de notre esprit collectif

mesure que nous mûrissons. Et en tant qu'adultes, nous continuons d'échouer parfois à anticiper avec précision les situations futures.

Ainsi, parce que la construction de scénarios imbriqués est un moyen risqué de prendre des décisions, les humains doivent associer cette faculté à une autre : celle de connecter leurs esprits. Le psychologue américain Michael Tomasello a décrit cette capacité comme l'« intentionnalité partagée ». Après tout, le meilleur moyen de s'informer sur l'avenir est d'interroger quelqu'un qui l'a déjà vécu, en quelque sorte. Si vous voulez vraiment savoir à quoi ressemblent des vacances en Nouvelle-Zélande ou vous informer sur le métier de psychologue, vous pouvez imaginer tous les scénarios que vous voulez, mais le mieux est de demander à quelqu'un qui a visité ce pays ou qui exerce ce métier.

Le langage humain est idéal pour de tels échanges ; la plupart de nos conversations portent sur des événements décalés dans le temps. De cette façon, nous pouvons apprendre de l'expérience d'autrui et de ses réflexions. Nous posons des questions et recevons des conseils, et nous nous construisons des images mentales à partir de tout cela. Mieux encore, nous pouvons façonner un avenir commun en coordonnant les actions de plusieurs

personnes. Nous le faisons souvent en commentant la stratégie d'un collègue ou d'un ami, en examinant les progrès qu'il a réalisés puis en le guidant vers la prochaine étape.

Tout ce que les humains ont accompli de grandiose, les merveilles architecturales, artistiques, scientifiques, etc., provient de notre esprit collectif. Nous utilisons tous dans notre quotidien des outils et des techniques inventés par d'autres. Beaucoup d'animaux utilisent des outils, certains en fabriquent même, mais pour qu'ils deviennent des innovations, il faut qu'il y ait conscience que l'outil pourra servir à nouveau dans le futur. C'est une étape nécessaire pour qu'ensuite un individu conserve l'outil, le perfectionne et le partage avec les autres.

On peut observer cette évolution dans l'histoire des armes. Se défendre à l'aide d'armes de jet était probablement un besoin vital pour nos ancêtres, qui côtoyaient des tigres à dents de sabre. Au début, ils se sont peut-être contentés de jeter des pierres pour éloigner les prédateurs, puis ils se sont équipés de lances, et plus tard de propulseurs pour donner davantage de puissance à la lance, et enfin d'arcs et de flèches. Toutefois, les nouveaux outils ne représentent une amélioration que si l'on peut les utiliser efficacement, ce qui ramène à la notion de pratique délibérée. Au Sénégal, les chimpanzés fabriquent des lances rudimentaires qu'ils enfoncent dans le creux des arbres pour tuer des galagos (petits primates ressemblant à des lémurins). Mais personne n'a rapporté avoir vu un chimpanzé pousser un objet ou le lancer pour arriver à ses fins. Contrairement aux humains, les chimpanzés ne tireraient aucun bénéfice de l'invention d'un propulseur de lance. Vous pouvez en donner un à un singe en toute sécurité, il ne saurait pas quoi en faire.

SPECIALISTES ET GÉNÉRALISTES

La preuve la plus ancienne d'une pratique délibérée a plus de 1 million d'années. Les outils de pierre acheuléens d'*Homo erectus*, datant d'environ 1,8 million d'années, témoignent déjà d'une capacité à anticiper l'avenir, puisqu'ils semblent avoir été transportés d'un endroit à un autre dans l'objectif d'être réutilisés. Leur fabrication nécessite des connaissances considérables sur les roches et sur la façon de les tailler. Sur certains sites, comme Olorgesailie, au Kenya, le sol est encore jonché de pierres taillées; pourquoi nos ancêtres ont-ils continué à fabriquer des outils quand ils en disposaient déjà en abondance? La réponse est sans doute qu'ils s'entraînaient à les façonner. Une fois la compétence acquise, ils pouvaient partir chasser avec l'assurance de savoir qu'ils pourraient en fabriquer un nouveau si jamais l'ancien se cassait.

On peut classer la plupart des espèces animales comme spécialistes ou généralistes, mais les humains sont les deux: nous sommes



Les humains éprouvent un fort besoin d'échanger des émotions et des pensées. Ce trait et la faculté de penser des scénarios imbriqués sont, selon l'auteur, décisifs dans l'émergence des capacités cognitives spécifiquement humaines.

capables de nous adapter rapidement à des contraintes locales, et même d'en anticiper des futures, en acquérant l'expertise nécessaire. En outre, grâce à la coopération et à la division du travail, nous pouvons bénéficier de compétences complémentaires, ce qui nous permet de dominer les habitats les plus divers. Nous pouvons même héberger les plus féroces prédateurs dans nos zoos, car nous pouvons prévoir leurs besoins et ce qu'ils peuvent et ne peuvent pas faire. Jusqu'à présent, il n'y a pas de preuve évidente que d'autres espèces se soient livrées à de tels voyages mentaux dans le temps ni aient élaboré un plan pour s'échapper du zoo dans un avenir prévisible.

Avec la construction de scénarios imbriqués et le désir impérieux de communiquer, nos ancêtres ont finalement engendré des civilisations et des techniques qui ont changé la face du monde. La science est l'expression disciplinée de notre esprit collectif, et elle nous aide à mieux connaître l'histoire de nos origines. Elle nous permet aussi d'orienter la course des événements en nous rendant clairvoyants. L'anticipation de nos actions a un prix: elle nous confronte à des choix moraux. En raison de la toute-puissance ambivalente de l'humanité, nous pouvons prédire les conséquences de la pollution ou de la destruction des habitats des animaux, informer les autres de ces ravages et, comme le démontre l'accord de Paris sur le climat, négocier des actions coordonnées à l'échelle mondiale pour stopper ou freiner le processus.

Rien de tout cela n'excuse l'arrogance. Nous sommes les seuls êtres sur cette planète à avoir ces capacités. Comme l'oncle de Spiderman ne manquait pas de lui rappeler, chaque fois que son neveu superhéros était en proie aux affres du doute: «Un grand pouvoir implique de grandes responsabilités.» ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Suddendorf et al., **Prospection and natural selection, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 24, pp. 26-31, 2018.**

J. Redshaw et al., **Flexible planning in ravens ?, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 21(11), pp. 821-822, 2017.**

M. Tomasello, **A Natural History of Human Thinking**, Harvard University Press, 2014.

T. Suddendorf, **The Gap : The Science of What Separates Us from Other Animals**, Basic Books, 2013.

L'ESSENTIEL

> Le langage humain est beaucoup plus structuré et complexe que les signaux gestuels ou vocaux des autres animaux.

> Mais les chercheurs n'ont pas trouvé de traits physiologiques, neurologiques ou génétiques capables d'expliquer la spécificité du langage humain.

> Le langage apparaît plutôt comme le fruit d'une plateforme de capacités, dont certaines sont communes avec d'autres animaux.

> La complexité du langage humain résulterait de la culture, c'est-à-dire de la transmission répétée d'éléments de discours au fil des générations.

L'AUTEURE



CHRISTINE KENNEALLY
journaliste scientifique
aux États-Unis, auteure
de *The First Word : The
Search for the Origins of
Language* (Viking, 2007)

Comment le langage s'est imposé

Parmi toutes les formes de communication rencontrées dans le monde animal, le langage humain fait figure d'exception. Comment a-t-il émergé ? Les particularités biologiques et cognitives des humains ne sont pas seules en jeu : de plus en plus, les scientifiques soulignent le rôle décisif qu'a joué la culture.

Les dauphins communiquent entre eux de façon relativement élaborée. Ils émettent des clics et des sifflements pour, par exemple, alerter de dangers tels que la présence de requins ou d'humains, se nomment les uns les autres, transmettent à leurs petits des connaissances utiles pour se nourrir ou pour échapper à des prédateurs...

Mais s'ils avaient un langage de même type que le nôtre, les dauphins ne se contenteraient pas de transmettre des informations ponctuelles à leurs congénères. Ils les regrouperaient en un vaste corpus de connaissances sur le monde. Au fil des générations, des pratiques intelligentes, des connaissances étendues et des techniques complexes se développeraient. Les dauphins finiraient par avoir une histoire. Et avec l'histoire, ils prendraient connaissance des vies et des idées d'autres groupes de dauphins, et n'importe quel individu pourrait hériter, par exemple, d'un récit ou d'un poème

associé à un autre individu ayant vécu des centaines d'années auparavant. Ce dauphin serait touché, à travers le langage, par la sagesse d'un autre dauphin, disparu depuis longtemps.

Seuls les humains peuvent effectuer ce spectaculaire voyage dans le temps, comme seuls les humains peuvent pénétrer dans la stratosphère ou confectionner une pâtisserie. C'est grâce au langage qu'existent la technologie moderne, la culture, l'art et la recherche scientifique.

Nous avons aussi la capacité de poser des questions telles que : « Pourquoi le langage est-il unique aux humains ? » Malgré le génie accumulé dont nous héritons quand nous apprenons à parler ou à écrire, nous n'avons pas encore de réponse satisfaisante à cette question. Mais depuis que des spécialistes du cerveau, des linguistes, des éthologues, des généticiens s'y sont attelés, nous sommes plus proches que jamais de la résolution de cette énigme.

Que le langage soit spécifique aux humains, on s'en doutait depuis longtemps. Mais il était étrangement tabou d'essayer de savoir



Exactement comment et pourquoi c'est le cas. Dans les années 1860, la Société de linguistique de Paris a interdit de discuter de l'évolution du langage, et la Philological Society of London en a fait de même dans les années 1870. Ces sociétés savantes voulaient peut-être sévir contre les spéculations non scientifiques, à moins qu'il ne s'agit de décisions de nature politique.

Quoi qu'il en soit, le sujet a suscité des tensions pendant plus d'un siècle. Le très influent linguiste américain Noam Chomsky s'est longtemps désintéressé de la question de l'évolution du langage, et son attitude a eu un effet paralysant sur le domaine. Au début des années 1990, alors que je suivais des cours universitaires de linguistique à Melbourne, en Australie, j'ai un jour demandé à mon enseignant comment le langage avait évolué. Il m'a dit que les linguistes ne se posaient pas la question, parce qu'il n'était pas vraiment possible d'y répondre.

UNE QUESTION QUI N'EST PLUS TABOUE

Heureusement, quelques années plus tard à peine, des chercheurs de diverses disciplines ont commencé à se pencher sérieusement sur la question. Les premières recherches sur l'évolution du langage ont mis au jour un paradoxe troublant. Le langage est, de toute évidence, spécifique aux humains. Il met en œuvre un ensemble de règles extrêmement compliquées pour combiner les sons, les mots et les phrases et produire quelque chose qui a du sens. Si d'autres animaux avaient un système similaire, nous le reconnaitrions probablement. Le problème, c'est qu'après avoir cherché pendant un temps considérable, et au moyen d'approches méthodologiques très diverses, on n'a rien trouvé d'unique en nous, ni dans le génome ni dans le cerveau, qui explique le langage humain.

Certes, les chercheurs ont trouvé des caractéristiques biologiques qui sont à la fois uniques aux humains et essentielles au langage. Par exemple, les humains sont les seuls primates à pouvoir contrôler volontairement leur larynx: bien qu'il y ait un risque d'étouffement, cela nous permet d'articuler la parole. Mais l'équipement biologique qui semble destiné au langage n'explique jamais complètement l'énorme complexité et utilité de celui-ci.

Il semble de plus en plus que le paradoxe ne soit pas inhérent au langage, mais à la façon dont nous le voyons. Longtemps, nous nous sommes accrochés à l'idée d'une mutation soudaine, explosive, qui a transformé de simples grands singes en humains. Cette notion de métamorphose est allée de pair avec une liste d'idées tout aussi tranchées. Par exemple que ce langage est un trait tout à fait particulier, qui n'a pas grand-chose en commun avec d'autres

types d'activités mentales. Que le langage est l'adaptation évolutive qui a tout changé; et que le langage est codé dans l'ADN des humains. Nous avons ainsi recherché un événement biologique critique qui a fait émerger, il y a environ 50000 ans, un langage élaboré.

Les découvertes de la génétique, des sciences cognitives et de celles du cerveau sont en train de converger vers une conception différente. Il semble que le langage ne soit pas une adaptation extraordinaire. Il n'est pas non plus entièrement codé dans le génome humain, ni n'est le fruit inéluctable de la supériorité du cerveau humain. Au lieu de cela, le langage semble s'être développé à partir d'une plateforme de capacités, certaines très anciennes et partagées avec d'autres animaux, d'autres plus modernes.

On n'a rien trouvé d'unique en nous qui explique le langage humain

Les éthologues ont été les premiers à remettre en question le caractère spécifiquement humain du langage. Comme l'a souligné Heidi Lyn, psychologue à l'université du Mississippi du Sud, la seule façon dont nous pouvons vraiment déterminer ce qui est unique au langage humain, c'est d'explorer les facultés des autres animaux. De façon intéressante, presque à chaque fois que des chercheurs ont affirmé que, grâce à leur langage, les humains peuvent faire des choses dont les autres animaux sont incapables, des études ont montré ensuite que des animaux peuvent faire certaines de ces choses, du moins de temps en temps.

Prenez les gestes, par exemple. Certains sont propres à l'individu, mais beaucoup sont communs à notre communauté linguistique et même à tous les humains. Il est clair que le langage a évolué dans le cadre d'un système de communication où le geste joue également un rôle. Mais des travaux fondateurs ont montré que les chimpanzés font aussi des gestes signifiants. Michael Tomasello, aujourd'hui chercheur émérite à l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig, en Allemagne, et ses collègues ont montré que



Alex, un célèbre perroquet jaco étudié pendant une trentaine d'années par la chercheuse américaine Irene Pepperberg, pouvait reconnaître et nommer une centaine d'objets différents en précisant leur couleur, leur texture et leur forme. Il pouvait aussi transmettre ses désirs et ses intentions au moyen de phrases telles que «Veux rentrer». Il est aussi possible à des chimpanzés d'apprendre un peu de langage humain.

toutes les espèces de grands singes attendent de capter l'attention d'un autre congénère avant de faire des signes, et ils répètent les gestes qui n'obtiennent pas la réponse souhaitée. Les chimpanzés frappent le sol avec les pieds ou les mains pour attirer l'attention et, tout comme un humain prêt à en découdre lève le poing, ils roulent les bras au-dessus de la tête (normalement en prélude à une attaque) en guise d'avertissement à leurs rivaux.

Pourtant, le groupe de Michael Tomasello a constaté que les grands singes avaient une très faible capacité de comprendre le geste humain consistant à pointer du doigt afin de montrer, par exemple, l'emplacement d'un objet caché. Mais le fait de pointer du doigt – ou plutôt la capacité de comprendre pleinement ce geste – représente-t-il une étape critique dans l'évolution du langage?

Quoi qu'il en soit, Heidi Lyn, qui a travaillé avec des bonobos, qui sont maintenant à l'ACCI (Apes Cognition & Conservation Initiative, une structure située dans l'Iowa, aux États-Unis), trouvait absurde l'affirmation de Michael Tomasello et ses collègues. «Mes singes comprenaient toujours quand je leur

montrais les choses du doigt», raconte-t-elle. Mais lorsqu'elle a mis en place, à l'université Emory, des expériences de pointage du doigt avec des chimpanzés, elle a eu la surprise de constater que ces singes ne comprenaient pas bien du tout son geste. Elle est alors retournée aux bonobos de son laboratoire et les a testés: ils comprenaient tous.

La différence entre singes pointeurs et singes non pointeurs n'avait rien à voir avec la biologie, conclut Heidi Lyn. On avait appris aux bonobos à communiquer avec les humains à l'aide de symboles visuels simples, mais pas aux chimpanzés. «C'étaient les singes n'ayant pas côtoyé les humains de la même façon qui ne pouvaient pas suivre le doigt pointé», explique-t-elle.

Selon Heidi Lyn, on a invoqué le fait que les bonobos avaient bénéficié d'un apprentissage dirigé par des humains pour récuser leur capacité, comme s'ils étaient en quelque sorte contaminés. Les recherches linguistiques sur les perroquets, les dauphins et autres animaux ont été discréditées pour la même raison. Mais Heidi Lyn soutient que les animaux dressés par des humains fournissent des renseignements intéressants. Si des animaux dotés de cerveaux et de corps différents des nôtres peuvent acquérir des aptitudes de communication semblables à celles des humains, cela signifie que le langage ne doit pas être défini comme entièrement humain et déconnecté du reste du monde animal. De plus, si le langage est influencé par la biologie, il n'est pas nécessairement déterminé par elle. Avec les bonobos, c'est la culture, et non la biologie, qui a fait la différence.

DES APTITUDES NON SPÉCIFIQUEMENT HUMAINES

La liste des aptitudes que l'on croyait autrefois spécifiques au langage humain est en fait assez longue. Cela inclut des parties du langage telles que les mots. Les singes vervets poussent des cris d'alarme semblables à des mots pour signaler un danger particulier (panthère, rapace, serpent). Un autre aspect crucial est la structure du langage. Grâce à la syntaxe, nous pouvons produire un nombre infini de phrases et de significations nouvelles, et nous sommes capables de comprendre des phrases que nous n'avons jamais entendues auparavant. Or les chants de certains oiseaux, tels les diamants mandarins, ont une structure compliquée, les dauphins peuvent comprendre les différences dans l'ordre des mots...

La liste s'étend aux facultés cognitives, telles que la «théorie de l'esprit», qui désigne la capacité de percevoir l'état mental d'autrui. Ainsi, les dauphins et les chimpanzés excellent à deviner ce que veut un interlocuteur. Même la notion de nombre n'est plus propre à l'humain: les abeilles et les singes rhésus peuvent compter jusqu'à >

quatre, les cormorans dressés pour la pêche en Chine seraient capables de compter jusqu'à sept, les abeilles ont une notion du zéro...

La liste comprend aussi des gènes. Le fameux gène *FOXP2*, autrefois appelé gène du langage, a en effet un rôle dans le langage, car, quand il est altéré, l'articulation de la parole est perturbée, mais il assure aussi d'autres fonctions. Les gènes sont essentiels pour comprendre comment le langage a évolué, concède Simon Fisher, généticien à l'institut Max-Planck de psycholinguistique, à Nimègue, aux Pays-Bas, «mais nous devons réfléchir à ce que font les gènes». Le processus est incroyablement complexe: les gènes codent pour des protéines, lesquelles agissent dans les cellules, qui peuvent être des neurones formant des circuits neuronaux, et ce sont ces circuits qui régissent le comportement. «Il se peut qu'il existe un réseau de gènes

importants pour le traitement syntaxique ou la maîtrise de la parole, explique Simon Fisher, mais il n'existe pas de gène qui soit responsable, à lui seul, d'une série de compétences.»

La liste des traits qui ne sont plus uniques aux humains inclut aussi les mécanismes cérébraux. Nous apprenons que les circuits neuronaux peuvent remplir des fonctions multiples. Par exemple, une étude récente a montré que certains circuits neuronaux sous-jacents à l'apprentissage du langage sont également mobilisés pour mémoriser des listes ou acquérir des compétences complexes, comme savoir conduire une voiture. Or les versions animales des mêmes circuits interviennent dans la résolution de problèmes similaires, comme, chez le rat, savoir sortir d'un labyrinthe.

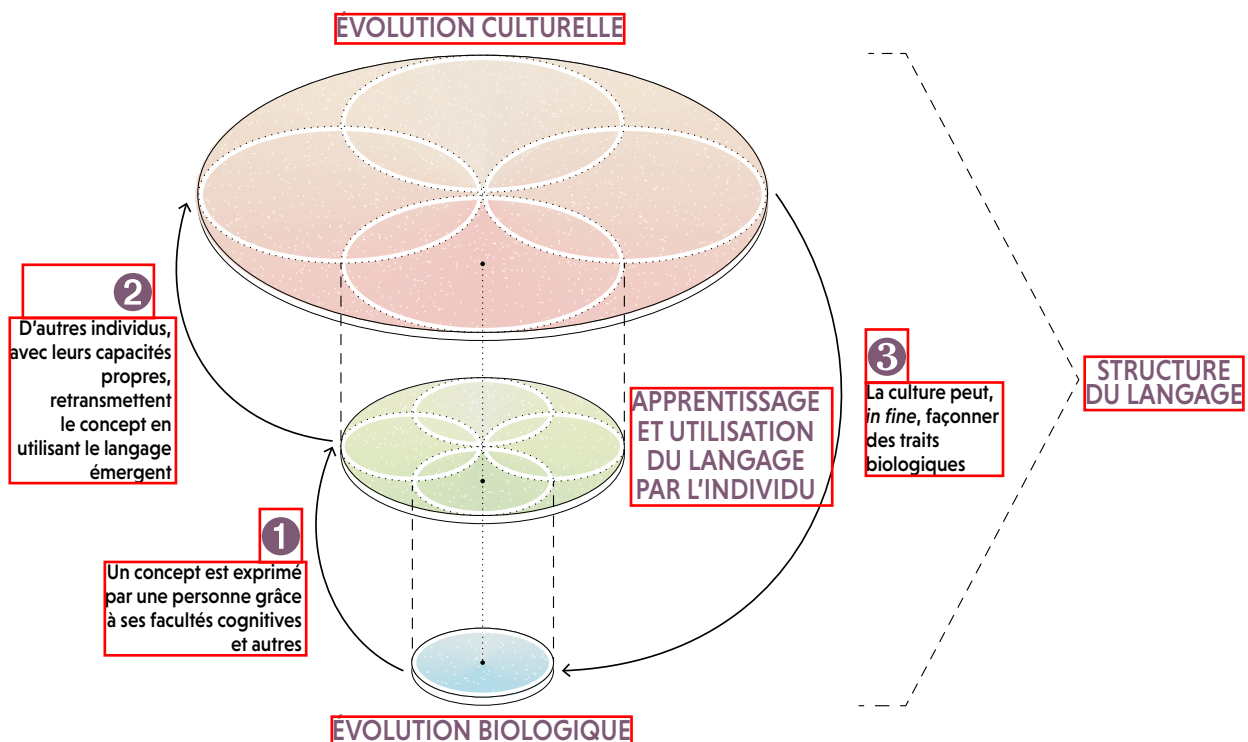
Michael Arbib, chercheur en neurosciences de la cognition à l'université de Californie à San

L'ÉVOLUTION DU LANGAGE

Les langues ont des structures complexes qui permettent à des locuteurs de comprendre par exemple ce que signifie «girafe bleue» même s'ils n'ont jamais rencontré cette combinaison de mots. Des travaux de Simon Kirby, de l'université d'Édimbourg, et d'autres linguistes suggèrent que la structure du langage découle de l'utilisation répétée des mots pour transmettre des idées sur plusieurs générations. Dans un processus circulaire répété d'innombrables fois, un locuteur transmet un concept à d'autres ❶

par le biais d'une chaîne de mots qu'il a apprise. Les destinataires de cette chaîne la comprennent du mieux qu'ils peuvent et la transmettent aux autres congénères ❷, avec leurs propres modifications. Ces changements s'accumulent dans la culture au fil des générations. Un individu maîtrisant mieux le discours qui émerge de sa communauté a plus de chances de transmettre ses gènes. Par conséquent, avec le temps, les raffinements culturels accumulés peuvent influencer les traits biologiques ❸. Étonnamment, de cette

Babel finit par émerger de l'ordre : les locuteurs, en essayant d'apprendre le langage du mieux qu'ils peuvent, finissent par converger vers un langage unique et structuré, qui à la fois se prête à l'apprentissage et est utile pour transmettre de l'information. En somme, le langage dans toute sa complexité émerge de la culture.



De multiples facteurs ont fait émerger le langage humain

Diego, fait remarquer que les humains ont créé un monde matériel et mental de plus en plus complexe, et pourtant, qu'un enfant naisse dans un monde où domine le train à vapeur ou dans un monde rempli de téléphones portables, il peut en maîtriser une partie sans que cela nécessite de modifications biologiques. «Pour autant que nous sachions, le seul type de cerveau sur terre qui peut le faire, c'est le cerveau humain», dit Michael Arbib. Tout en soulignant que le cerveau n'est qu'une partie d'un système complexe qui inclut le corps: «Si les dauphins avaient eu des mains, ils auraient peut-être pu faire apparaître un tel monde.»

Le monde humain est forgé non seulement par un cerveau intégré à un corps, mais aussi par un groupe de cerveaux qui interagissent socialement. D'où la nécessité de ce que Michael Arbib appelle une approche EvoDevoSocio. L'évolution biologique influe sur le développement de l'individu et sur son apprentissage, et l'apprentissage des individus façonne l'évolution culturelle; inversement, l'apprentissage peut être modelé par la culture. De multiples facteurs ont fait émerger le langage humain, explique Michael Arbib. Et ce processus ne s'est pas produit d'un seul coup, mais a pris beaucoup de temps.

RÉVOLUTION CULTURELLE

Simon Kirby, qui dirige le Centre sur l'évolution du langage à l'université d'Édimbourg, pense aussi que la culture joue un rôle essentiel. Dès le début, ce chercheur en sciences cognitives a été fasciné par le fait que nous apprenons le langage des autres, mais aussi qu'il se transmet de génération en génération. Quel impact l'acte d'apprentissage répété a-t-il eu sur le langage lui-même?

Simon Kirby a entrepris d'étudier la question selon une toute nouvelle méthode. Au lieu d'observer des animaux ou des humains, il a conçu des modèles informatiques de locuteurs, des «agents», et a nourri ceux-ci de chaînes de caractères désordonnées et aléatoires. Ses agents artificiels devaient apprendre le langage auprès d'autres agents, puis l'enseigner à d'autres encore. Simon Kirby a alors réalisé des

simulations enchaînant plusieurs générations d'apprenants et d'enseignants pour voir comment le langage pourrait changer. Il comparait cela au jeu du téléphone arabe, où un message est transmis par une seule personne à la suivante et ainsi de suite, le message final étant souvent très différent de l'original.

Simon Kirby a découvert que ses agents simulés avaient tendance à produire un langage plus structuré que celui qu'ils avaient reçu. Même si les chaînes de caractères qu'il leur donnait initialement étaient aléatoires, parfois, il pouvait apparaître par hasard une chaîne comportant une petite régularité. Les agents s'emparaient alors de cette structure et la généralisaient. «Les apprenants, si vous voulez, croyaient voir de la structure dans les données qu'ils recevaient», raconte Simon Kirby. En voyant de la structure là où il n'y en avait pas, les agents reproduisaient plus de structure dans les chaînes de caractères qu'ils produisaient à leur tour.

Simon Kirby explique qu'au début, les changements peuvent être minuscules, mais qu'au fil des générations, le processus fait boule de neige. De façon captivante, non seulement le langage des agents commence à apparaître de plus en plus structuré après plusieurs générations, mais le genre de structure qui émerge ressemble à une version simple de celle que l'on trouve dans le langage humain naturel. Par la suite, Simon Kirby a testé plusieurs modèles différents, en les alimentant de divers types de données, mais il a constaté que «l'accrétion cumulative de structure linguistique semblait toujours se produire, peu importe comment nous construisions les modèles». C'était le processus d'apprentissage répété qui engendrait de lui-même le langage.

À présent, Simon Kirby transpose ses expériences numériques à des humains, et même des animaux, en leur faisant répéter ce qu'ils apprennent. Il trouve que de la structure apparaît en effet de cette façon. L'une des implications les plus captivantes de cette découverte est qu'elle aide à comprendre pourquoi on ne trouve jamais le bon gène, la bonne mutation ou le bon circuit cérébral qui expliquerait le langage. Celui-ci semble le fruit d'une combinaison de traits biologiques, d'apprentissage individuel et de transmission du langage d'un individu à l'autre. Les trois systèmes fonctionnent à des échelles de temps totalement différentes, mais, quand elles s'imbriquent, quelque chose d'extraordinaire se produit: le langage apparaît.

Les recherches sur l'évolution du langage constituent un champ scientifique encore jeune. Les chercheurs n'ont pas atteint le graal escompté, à savoir un événement crucial expliquant l'apparition du langage, mais leurs travaux montrent que cette quête est probablement vaine. L'émergence du langage est un processus plus multifactoriel qu'on ne le pensait. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Lyn, **The question of capacity : Why enculturated and trained animals have much to tell us about the evolution of language**, *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 24(1), pp. 85-90, 2017.

S. Kirby, **Culture and biology in the origins of linguistic culture**, *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 24(1), pp. 118-137, 2017.

J.-M. Hombert et G. Lenclud, **Comment le langage est venu à l'homme**, Fayard, 2014.

M. A. Arbib, **How the Brain Got Language : The Mirror System Hypothesis**, Oxford University Press, 2012.

L'AUTEUR



CHET C. SHERWOOD
professeur d'anthropologie
à l'université
George-Washington,
à Washington, aux États-Unis

Un cerveau hors catégorie

Un encéphale particulièrement gros, un cortex particulièrement plissé, des connexions neuronales particulièrement nombreuses...
Le cerveau humain est singulier dans le monde animal.

Le cerveau d'*Homo sapiens*, l'homme moderne, se démarque par de nombreux aspects de celui de ses ancêtres et des autres animaux. Avec un poids moyen d'environ 1,5 kilogramme, soit 2 % de la masse corporelle (mais 20 % de l'énergie consommée!), il est près de

trois fois plus gros que celui des premiers hominés et de celui de ses cousins, les grands singes actuels. Et il déroge au rapport entre la taille du cerveau et celle du corps constaté chez la plupart des espèces animales.

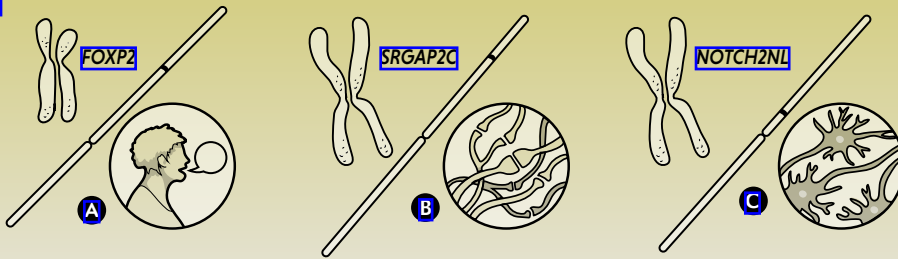
Des études détaillées du cerveau humain et de celui des primates, tel le chimpanzé, mettent en évidence de nombreuses spécificités. Par exemple, certaines régions du cortex cérébral, impliquées dans des fonctions cognitives complexes telles que la créativité ou la pensée abstraite, sont plus grandes chez l'humain. Ces zones corticales, nommées aires associatives, continuent de se développer après la naissance et arrivent à maturité assez tard. Certaines connexions neuronales à grande distance reliant ces aires associatives entre elles mais aussi avec le cervelet (ce dernier jouant un rôle dans les mouvements volontaires et l'apprentissage de nouvelles compétences) sont plus nombreuses que chez les autres primates. Ces réseaux renforcés chez l'humain sont le siège du langage, de

la fabrication d'outils et de l'imitation. Même des circuits de la récompense dans une aire subcorticale, le striatum, centre névralgique de l'activité de la dopamine (un neurotransmetteur), semblent avoir eu une histoire évolutive différente chez l'humain. Ces changements ont probablement augmenté la perception des signaux sociaux et facilité l'apprentissage du langage.

Mais quels facteurs ont conduit à la formation d'un si gros cerveau? Le registre fossile des hominés met en évidence une tendance générale de croissance du volume crânien au cours des six derniers millions d'années environ. Cela correspond à la séparation de notre lignée de celle des chimpanzés et des bonobos. En étudiant différents aspects de la biologie humaine, les chercheurs ont identifié un ensemble de facteurs interconnectés qu'ils associent à ce gros cerveau: une croissance plus progressive durant l'enfance et une durée de vie plus grande, par exemple. Cette importante croissance cérébrale après la naissance implique que de nombreuses étapes du développement cognitif se déroulent dans un contexte social et environnemental riche.

Les chercheurs ont aussi découvert des modifications génétiques et moléculaires qui ont eu lieu au cours de l'évolution du cerveau. Elles expliqueraient aussi certaines différences entre l'humain et les autres primates. ■

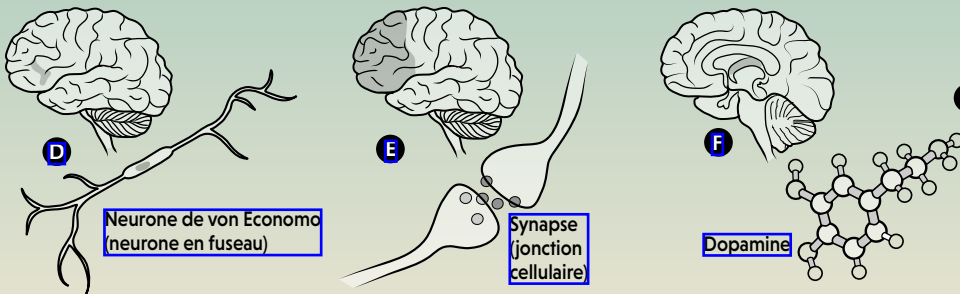
GÈNES



GÈNES

- A** Le variant du gène *FOXP2* spécifique à l'humain joue un rôle dans l'apprentissage de la parole.
- B** *SRGAP2C*, une version du gène *SRGAP2* que l'on ne trouve que chez l'humain, augmente la densité de connexions neuronales.
- C** La version humaine du gène *NOTCH*, nommée *NOTCH2NL*, a trois copies dans le génome et aide à la production de neurones.

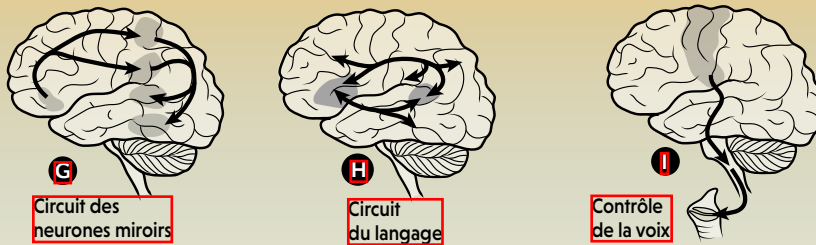
CELLULES



CELLULES

- D** Les neurones de von Economo jouent un rôle clé dans les circuits liés aux émotions sociales. Ils sont plus développés chez l'humain.
- E** L'activité de l'ARN et la synthèse de protéines sont plus importantes dans les synapses du cortex préfrontal (*en gris*) de l'humain que chez les primates.
- F** Les cellules libèrent dans le striatum plus de dopamine, un neurotransmetteur impliqué dans diverses fonctions cognitives.

CIRCUITS

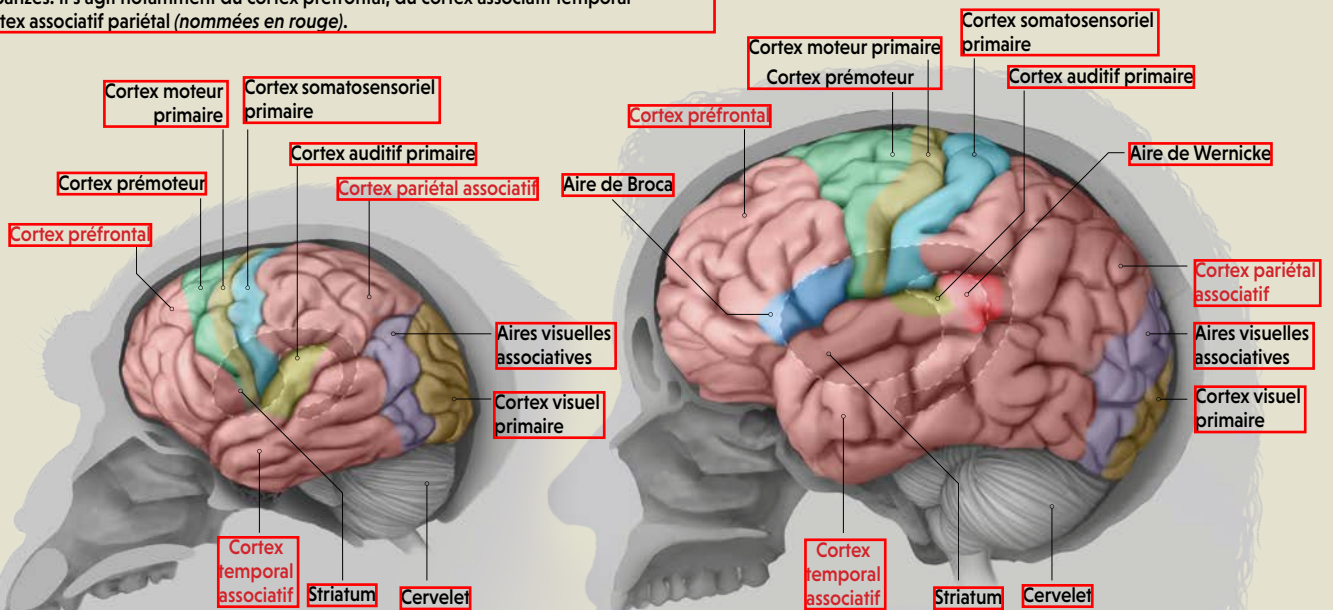


CIRCUITS

- G** Le système des neurones miroirs, qui s'active quand on regarde les gestes d'autrui, repose sur un réseau complexe chez l'humain.
- H** De riches connexions entre deux régions – les aires de Wernicke et de Broca – constituent des circuits essentiels au traitement du langage.
- I** Un lien entre le cortex moteur et le tronc cérébral coordonne les muscles du larynx. Ce circuit est absent chez les macaques et les chimpanzés.

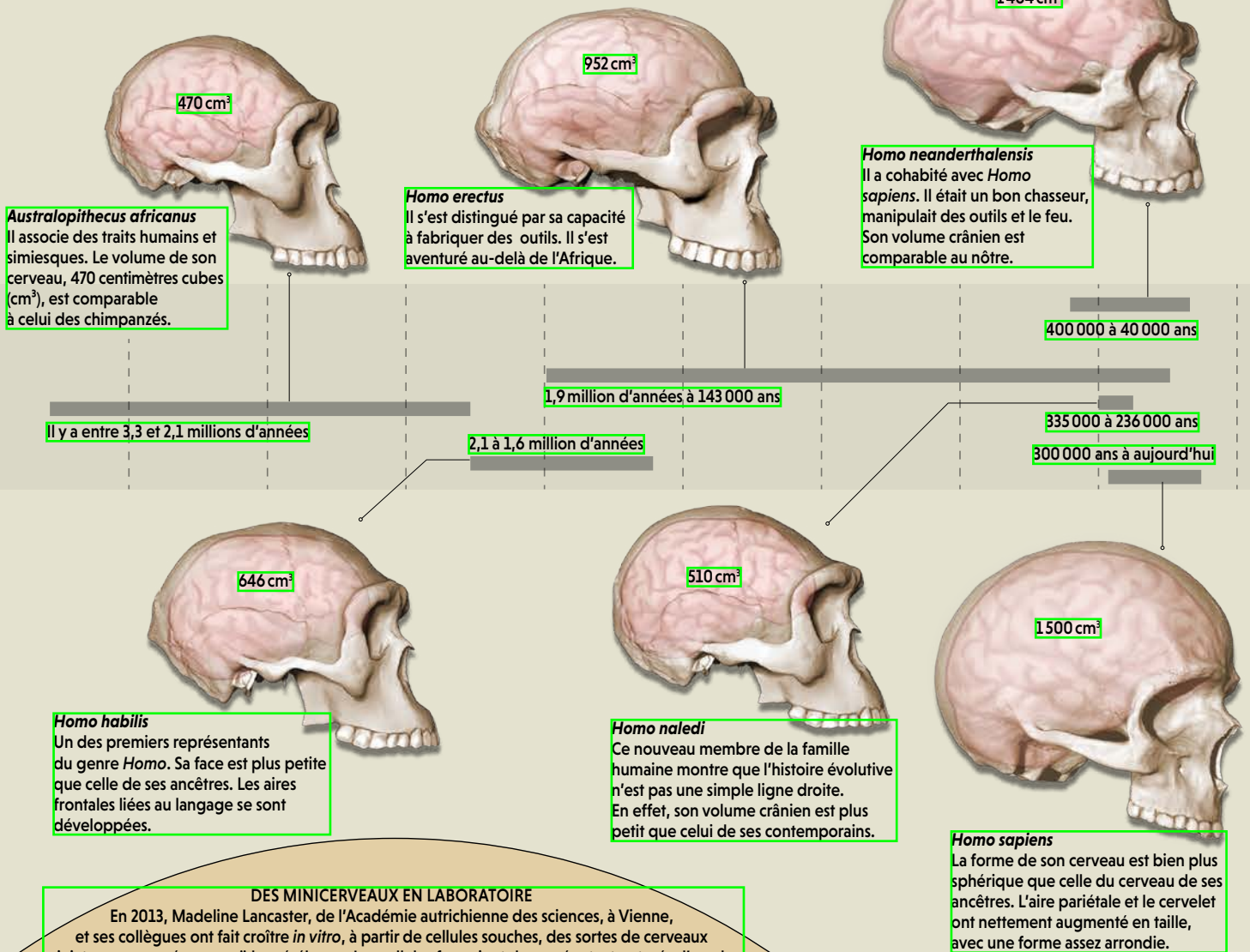
FORT DÉVELOPPEMENT DE CERTAINES AIRES CÉRÉBRALES

Certaines régions du cerveau, responsables de fonctions cognitives supérieures, ont augmenté de taille de façon disproportionnée chez les humains, comparées aux mêmes aires chez les chimpanzés. Il s'agit notamment du cortex préfrontal, du cortex associatif temporal et du cortex associatif pariétal (*nommées en rouge*).



UN CERVEAU TROIS FOIS PLUS VOLUMINEUX QUE CHEZ NOS ANCÊTRES

Le dernier ancêtre commun des humains, des chimpanzés et des bonobos aurait vécu il y a entre 8 et 6 millions d'années. Après la séparation des deux lignées, de nombreuses adaptations évolutives sont apparues : la bipédie, la fabrication d'outils en pierre, une augmentation du volume du cerveau chez certaines espèces d'homininés (processus qui s'est ensuite accéléré).



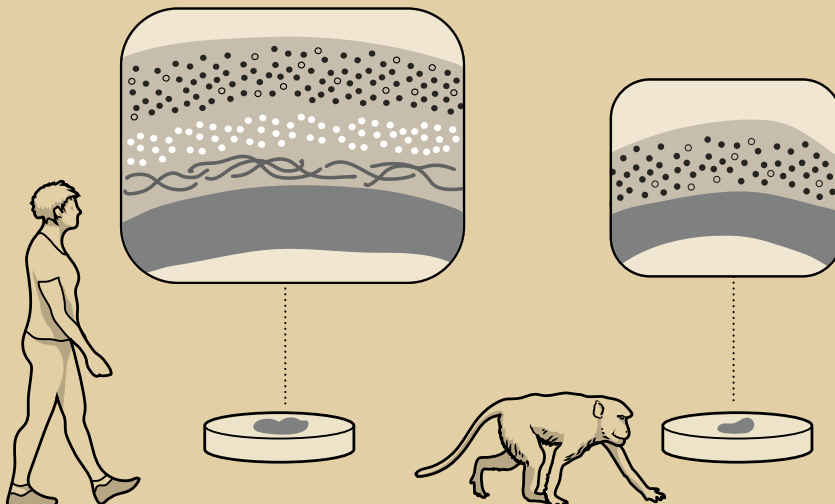
DES MINICERVEAUX EN LABORATOIRE

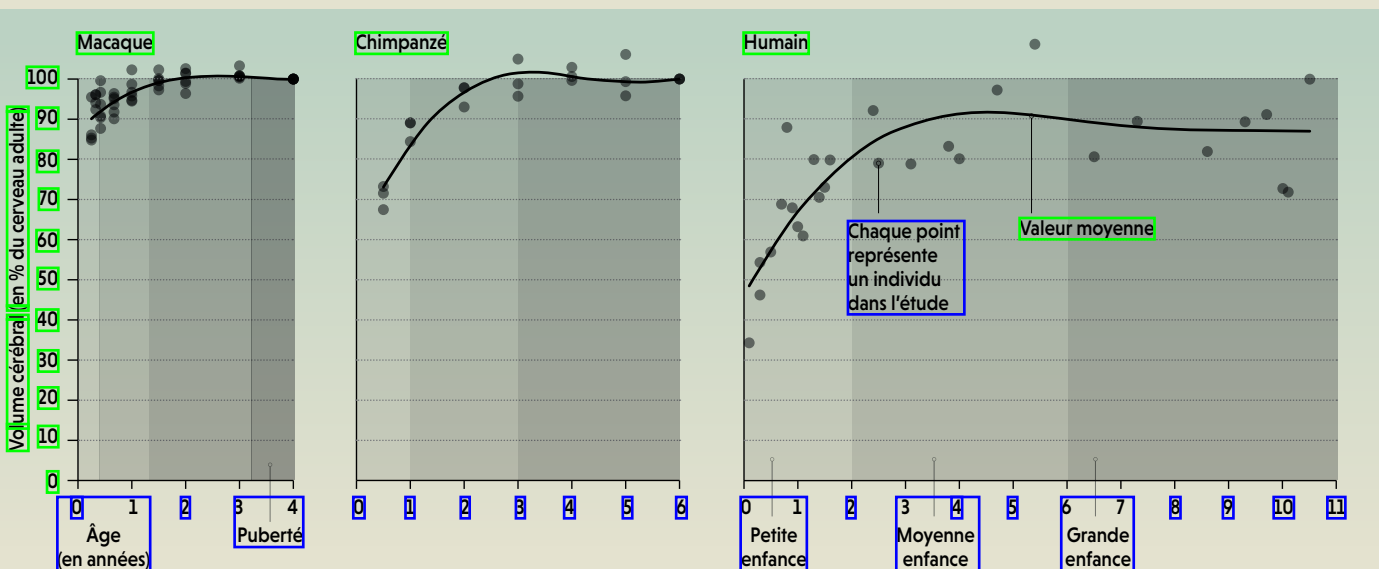
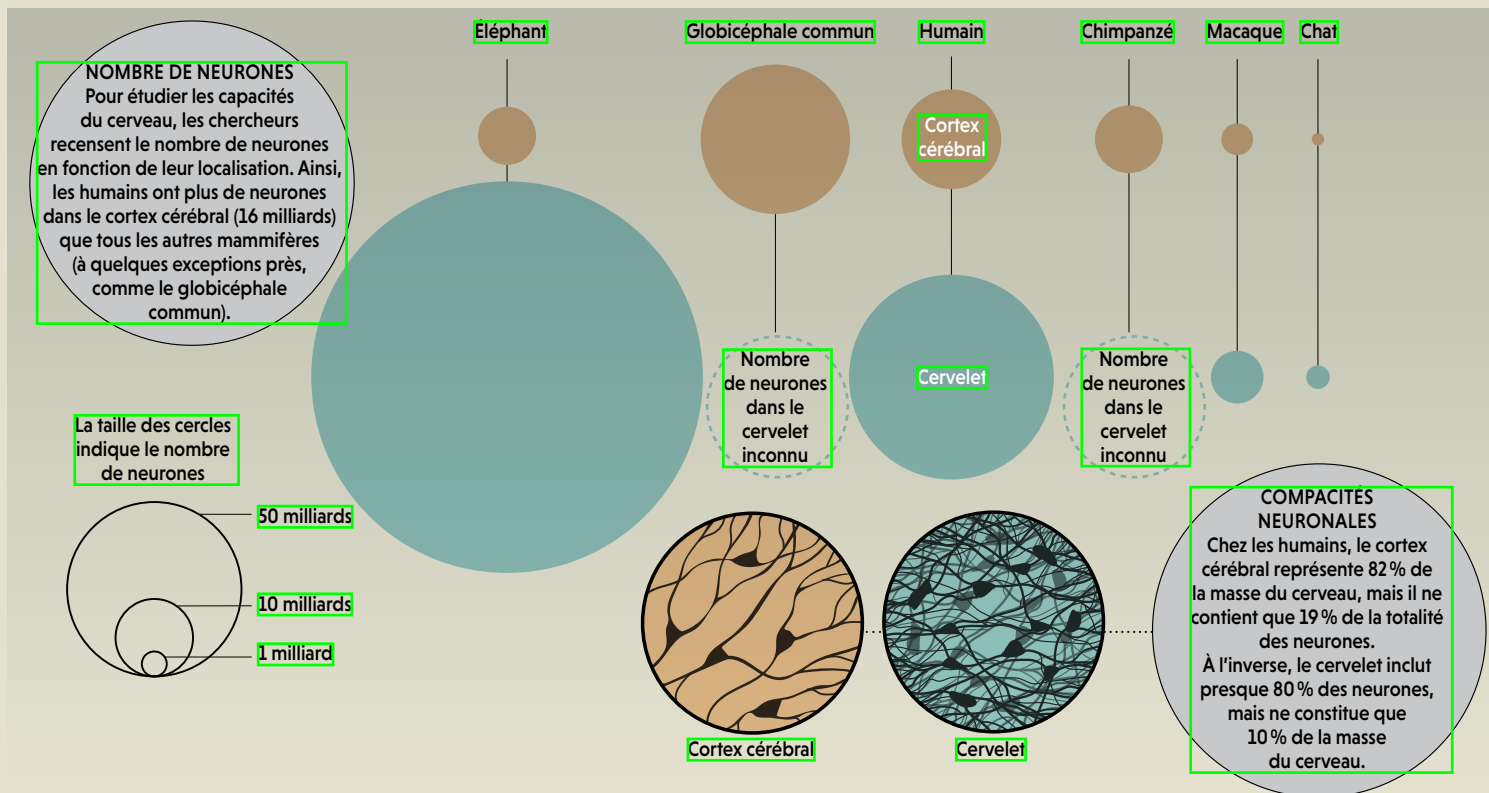
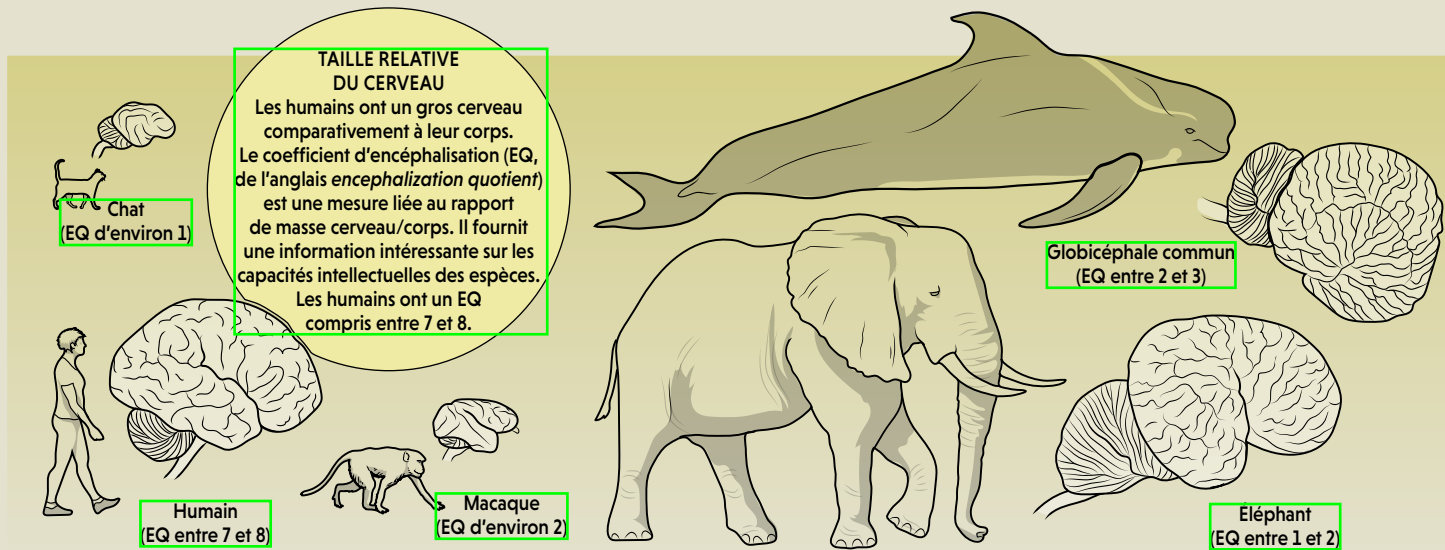
En 2013, Madeline Lancaster, de l'Académie autrichienne des sciences, à Vienne, et ses collègues ont fait croître *in vitro*, à partir de cellules souches, des sortes de cerveaux miniatures, nommés organoïdes cérébraux. Les cellules formaient des agrégats structurés d'au plus 4 millimètres, dont l'organisation et l'architecture rappellent celles du cortex cérébral humain aux stades précoces du développement. Ces organoïdes cérébraux offrent un outil unique pour étudier l'activité des gènes et le développement des circuits neuronaux. Des études comparées, avec ces minicerveaux humains, de primates non humains ou d'autres espèces, aideront à déterminer ce qui rend *Homo sapiens* unique.

COMMENT LE CERVEAU GRANDIT

Comparés à d'autres primates, les bébés humains ont un cerveau sous-développé. Ce dernier grandit plus vite la première année et se démarque après plusieurs années en acquérant un volume près de trois fois supérieur à celui d'un chimpanzé.

Sources : T. Sakai *et al.*, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 270, 22 février 2013 ; E. K. Boyle et B. Wood, *Evolution of Nervous Systems*, Academic Press, 2017 ; Smithsonian National Museum of Natural History (<http://humanorigins.si.edu>) ; S. Herculano-Houzel *et al.*, *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 86(3-4), déc. 2015 ; D. Jardim-Messeder *et al.*, *Frontiers in Neuroanatomy*, vol. 11, article 118, déc. 2017 ; H. S. Mortensen *et al.*, *Frontiers in Neuroanatomy*, vol. 8, article 132, nov. 2014 ; C. E. Collins *et al.*, *PNAS*, vol. 113(3), 19 janvier 2016.





L'ESSENTIEL

> En novembre 2018, la Conférence générale des poids et mesures entérinera une vaste réforme du système international d'unités.

> Quatre unités de base, le kilogramme, le kelvin, l'ampère et la mole, seront définies à partir de constantes fondamentales de la nature dont la valeur est désormais fixée.

> Les avancées scientifiques et techniques du xx^e siècle ont rendu possible cette réforme en permettant de mesurer ces constantes avec une précision suffisante.

> Mais le principe de la redéfinition des unités est bien plus ancien...

L'AUTEURE



NADINE DE COURTENAY
philosophe des sciences,
maîtresse de conférences
à l'université Paris-Diderot,
affiliée au laboratoire
Sphere

Vers un système d'unités vraiment universel

Le SI, le Système international d'unités, a été inventé pour faciliter les échanges scientifiques et commerciaux. Sa construction, tout comme sa réforme imminente, vise à la fois à intégrer les connaissances scientifiques les plus avancées et à édifier un monde social commun.

Le « grand K » est à quelques jours de la retraite. Depuis plus de cent ans, ce petit cylindre de platine iridié, conservé au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres, est la référence mondiale du kilogramme. Mais en novembre prochain, la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) entérinera une vaste réforme du Système international d'unités. Le kilogramme, mais aussi le kelvin, l'ampère et la mole seront désormais définis à partir de constantes fondamentales de la nature, respectivement la constante de Planck, h , la constante de Boltzmann, k , la charge électrique élémentaire, e , et le nombre d'Avogadro, N_A .

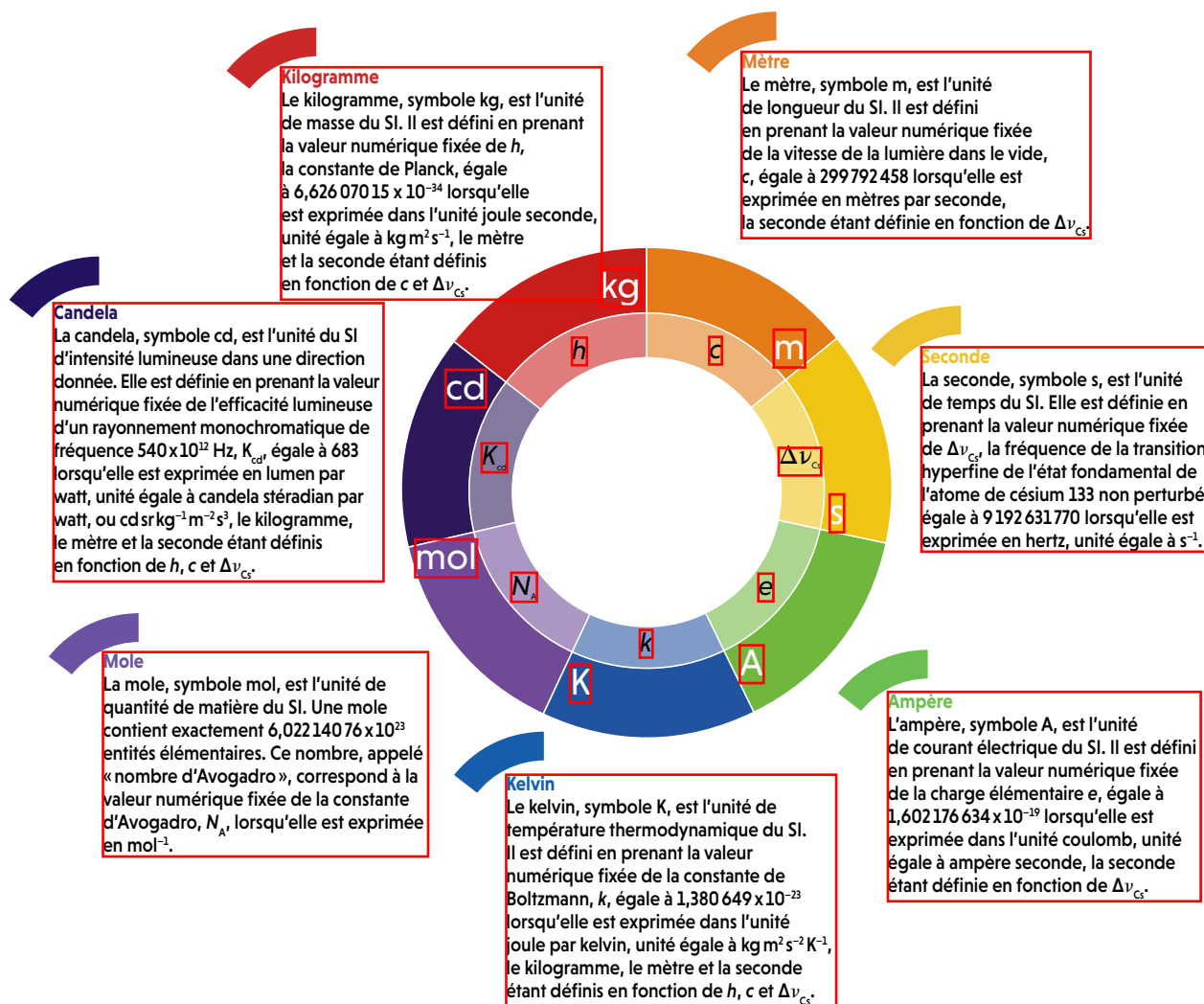
Avec cette réforme, la science fondamentale vient donc se loger au cœur de la question des unités, d'ordinaire assignée au domaine pratique, social et politique. Mais cela signifie-t-il pour autant que la théorie est en passe de gouverner le monde de la pratique? On pourrait le

croire à première vue. En effet, en faisant valoir que certaines unités de base du système international vont être redéfinies à partir de constantes fondamentales de la nature, on rattache la réforme à une entreprise de connaissance « pure » et l'on fait du nouveau système l'expression d'une nature indépendante de nous. Mais à l'inverse, on peut voir la réforme comme une conquête tout instrumentale, car après tout, sans les moyens techniques actuels, il aurait été impossible de matérialiser ces définitions par les étalons les plus stables, universels et accessibles jamais atteints. Or de telles références communes sont nécessaires aussi bien à la fabrication des produits de haute technologie qu'à une meilleure régulation des échanges internationaux.

Alors, que penser? En fait, une réflexion plus approfondie sur les unités, et tout particulièrement sur l'évolution actuelle du Système international, invite à dépasser cette tension entre théorie et pratique. En effet, les unités,



La masse du K92, étalon conservé aux États-Unis (*ci-contre*), et celle du grand K, l'étalon actuel du kilogramme, dérivent l'une par rapport à l'autre. Il en va de même de la masse de toutes les autres copies du grand K.



➤ choisies dès la plus haute antiquité pour remplir les fonctions administratives et sociales liées à la régulation des échanges, ne sont pas seulement impliquées dans les aspects pratiques de la vie en société, mais aussi dans ses aspects cognitifs. Sans unités communes et stables, nous ne pourrions communiquer à autrui nos conclusions expérimentales sous forme quantitative, ni les reproduire, ni donc nous accorder sur la validation des théories ou des modèles scientifiques de manière à transformer des jugements individuels et locaux en connaissances publiques partagées. C'est dire que les unités qui, d'un point de vue strictement théorique, paraissent accessoires, constituent la pierre de touche de l'objectivité scientifique.

On le voit, la théorie et la pratique ne sont pas juste deux versants de nos activités. Elles s'articulent de façon complexe, et la dernière réforme du Système international, ainsi que toutes celles qui l'ont précédée depuis l'invention du système métrique – le premier système métrologique construit par des savants –, révèlent particulièrement bien cette complexité en montrant la profonde solidarité qui

unit le développement de la connaissance théorique à l'évolution des moyens que nous mettons en œuvre pour coordonner nos actions, construire du commun, bref, vivre ensemble en société.

UN SYSTÈME D'UNITÉS TRÈS DISPARATES

Le Système international d'unités actuel repose sur un ensemble fort hétérogène de définitions. Le kilogramme, par exemple, est défini à la manière des unités les plus anciennes de l'humanité, par la masse d'un prototype; l'unité de température thermodynamique, le kelvin, dépend quant à elle de la température du point triple de l'eau, ce point où cohabitent les trois états de l'eau (solide, liquide, vapeur), particulièrement compliqué à reproduire, car la moindre impureté le modifie; l'unité de temps, la seconde, est fondée sur une propriété d'un composant microscopique naturel immuable de l'Univers, l'atome de césium, dont il existe une myriade d'exemplaires identiques – un mode de définition que le physicien écossais James Clerk Maxwell avait suggéré dès 1870; et l'unité de

Les nouvelles définitions du Système international révisé qui seront présentées à la 26^e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), du 13 au 16 novembre 2018.

longueur, le mètre, est définie depuis 1983 à partir d'une loi de la nature et d'une constante fondamentale dont la valeur est désormais fixée, la vitesse de la lumière, c .

La réforme fut lancée en 2005 lorsqu'un groupe de métrologues appela à réviser la définition du kilogramme, qui semblait incapable de fournir une référence suffisamment stable: la comparaison de la masse du prototype avec ses copies, servant de références dans les différents pays, manifestait une variation de 50 microgrammes par siècle. Dès 2006, le groupe proposa d'étendre la révision aux unités d'intensité du courant électrique, de température et de quantité de matière en définissant toutes ces unités à partir de références constituant de véritables invariants de la nature. De fait, la réforme qui sera entérinée en novembre prochain redéfinira le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole sur le modèle du mètre, en prenant pour référence des constantes fondamentales considérées comme des invariants dans l'état actuel de nos connaissances. Ce faisant, elle rompra définitivement avec le mode de définition ancestral fondé sur l'adoption d'un artefact matériel et mettra la métrologie en harmonie avec les avancées théoriques les plus abstraites et les techniques les plus élaborées du moment.

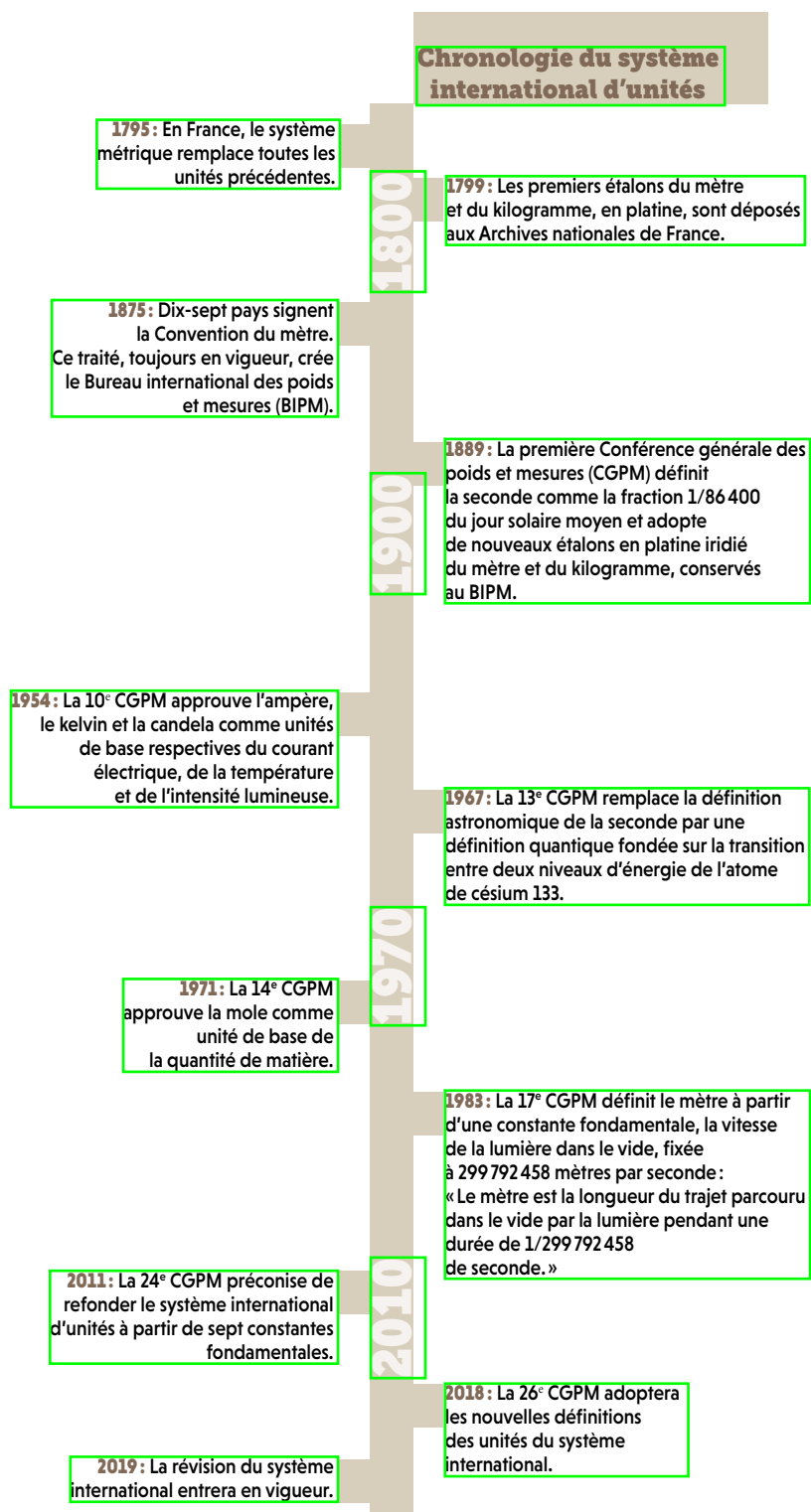
QUE SIGNIFIE FIXER UNE CONSTANTE ?

Le principe des redéfinitions proposées consiste, comme dans le cas du mètre, à fixer la valeur d'une constante fondamentale. Mais comment prétendre fixer la valeur d'une constante? Cette valeur n'est-elle pas donnée par la nature et non par nous? Comme l'explique Terry Quinn, directeur émérite du BIPM, les constantes fondamentales telles que la vitesse de la lumière ou la constante de Planck sont certes des constantes de la nature et sont donc considérées comme indépendantes de nous; cependant, lorsque nous cherchons à les connaître et à les déterminer par l'expérience en les rapportant à des grandeurs connues, c'est-à-dire des unités choisies au préalable, les valeurs obtenues dépendent bel et bien de ces unités et comportent une incertitude de mesure.

Ainsi, avant que l'on fixe c , la vitesse de la lumière, en 1983, sa valeur numérique dans le système d'unités antérieur valait 299 792 458 avec une incertitude de 1,2 lorsqu'on la mesurait en mètres par seconde, et 983 571 056,4 lorsqu'on la mesurait en pieds par seconde. Cependant, une fois ce résultat obtenu, il est possible d'inverser le processus en décidant de fixer, au sens de geler et définir comme étant exacte, la valeur de c obtenue par la mesure dans l'ancien système d'unités, en posant $c = 299 792 458$ mètres par seconde exactement, sans incertitude. Et si l'on conserve l'unité de temps de l'ancien système (qui était déjà,

depuis 1967, la seconde définie à partir d'une propriété de l'atome de césium), c'est alors la taille de l'unité de longueur, le mètre, qui se trouve assignée, puisqu'elle est de la sorte étalonnée par la valeur fixe attribuée à la vitesse de la lumière et par l'unité de temps déjà choisie.

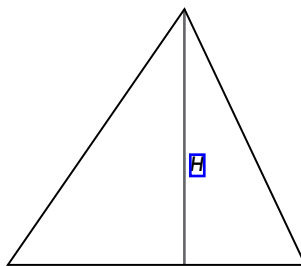
Bien sûr, cette valeur dépend des anciennes unités, c'est-à-dire de la définition du mètre qui a servi à exprimer la valeur expérimentale de >



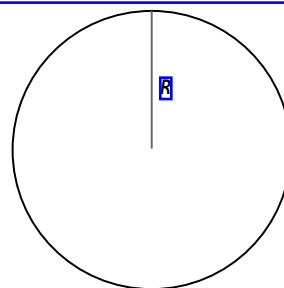
calcul symbolique, l'on introduit des constantes fondamentales. Voyons (sans aucune prétention historique) comment s'opère cette articulation dans le cas de l'aire et de la longueur.

--

$$A_{\text{rectangle}} \propto LL'$$

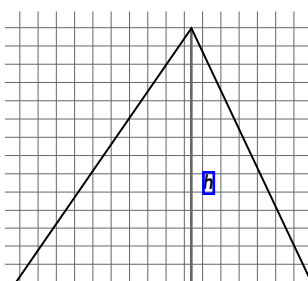


$$A_{\text{triangle}} \propto BH$$

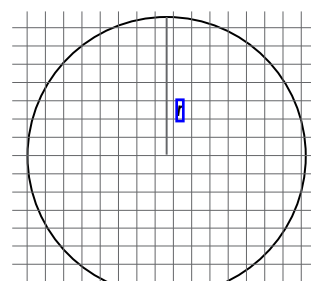


$$A_{\text{circle}} \propto R^2$$

$$a_{\text{rectangle}} \approx 144 \text{ II}'$$



$$a_{\text{triangle}} \approx 72 bh = 144 bh / 2$$



$$a_{\text{cercle}} \simeq 452 r^2 \simeq 144 \pi r^2$$

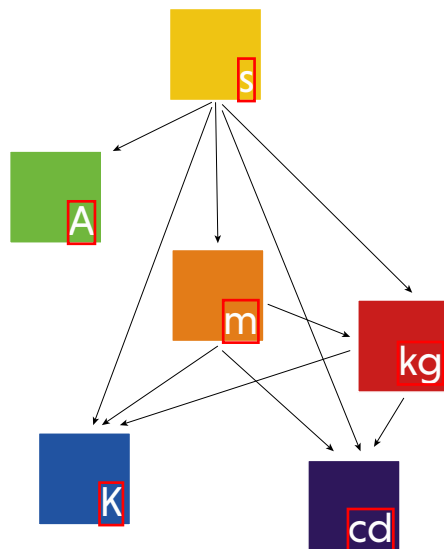
Option 1 : de façon dogmatique, on décide que les constantes numériques qui interviennent dans les expressions empiriques sont des constantes fondamentales dimensionnées. La constante $C = 144$ pouces carrés par pied carré apparaît alors comme une constante géométrique fondamentale reliant les aires de surfaces planes et les longueurs. Les équations ont ainsi l'avantage d'être indépendantes des unités choisies, car la valeur numérique de C varie en fonction des unités d'aire et de longueur de manière à laisser l'équation invariante. Elles peuvent donc être écrites entre les grandeurs elles-mêmes :

$$\begin{aligned} A_{\text{rectangle}} &= C \times LL' \\ A_{\text{triangle}} &= C \times BH/2 \\ A_{\text{circle}} &= C \times \pi R^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{rectangle}} &= LL' \\ A_{\text{triangle}} &= BH/2 \\ A_{\text{circle}} &= \pi R^2 \end{aligned}$$

Conséquence 2 : le choix de la valeur de C détermine la taille de l'unité d'aire en fonction de l'unité de longueur. Ici, l'unité d'aire doit être définie par 144 carrés de un pouce de côté, soit 144 pouces carrés, soit 12² pouces carrés, soit 1 pied carré. L'on aura alors construit un système cohérent d'unités dans lequel l'équation $A_{\text{rectangle}} = LL'$ est indifféremment interprétable comme une équation entre grandeurs physiques ou une équation entre mesures de ces grandeurs, ce qui facilite le passage de la théorie à l'expérience.

Dans le nouveau système international, toutes les unités de base, hormis la mole (non représentée), dépendent de la seconde : le mètre, par exemple, dépend d'une constante fondamentale, la vitesse de la lumière, c , et de la seconde. Il en va de même pour les autres unités du système international, car toutes sont dérivées de ces unités de base : le newton est le kilogramme mètre par seconde carrée, le joule est le newton mètre, le coulomb est l'ampère seconde, etc. Le physicien allemand Carl Friedrich Gauss a amorcé la construction de ce système en rapportant une grandeur physique, la force, à un ensemble d'unités de base et non plus à une unité propre de même nature.



la constante, et par là de la première définition du mètre – le quart de la dix millionième partie du méridien terrestre, mesuré dans les années 1790 par les astronomes Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain. Cette dépendance est essentielle pour maintenir la continuité historique des résultats expérimentaux ; les résultats obtenus dans l'ancien système demeurent ainsi valables dans le nouveau. Le même procédé servira à redéfinir les autres unités. Ainsi, après avoir été déterminée expérimentalement dans les unités actuelles du système international, la constante de Planck sera fixée sans incertitude à la valeur $h = 6,62607015$ kilogrammes mètres carrés par seconde, et cette valeur servira à déterminer en retour, sur la base des unités existantes du mètre et de la seconde, la « taille » de l'unité de masse, c'est-à-dire la nouvelle définition du kilogramme.

Ces explications soulèvent bien des questions. Comment comprendre le rôle des constantes fondamentales dans ce processus de redéfinition ? Le geste de fixer leur valeur ne constitue-t-il qu'une convention ou comporte-t-il une signification et des conséquences épistémiques plus profondes ? Que recouvre au juste l'inversion sur laquelle repose la redéfinition ?

Déjà à la fin du XIX^e siècle, le physicien irlandais George Stoney, puis Max Planck en 1900, avaient rêvé de mettre en place un système « naturel » d'unités fondé sur des constantes fondamentales. La réforme du système international n'a toutefois vraiment pu être envisagée qu'avec l'élaboration et la maîtrise, toute récente, d'expériences permettant de mesurer les constantes fondamentales avec une exactitude satisfaisante. Mais si les développements scientifiques et techniques du XX^e siècle sont bien au cœur de la réforme, le principe de la redéfinition des unités du système international participe, quant à lui, d'un procédé très ancien

qui gouverne à la fois le regroupement des unités en systèmes d'unités reliées entre elles et un travail de reconfiguration des concepts de la physique entérinant progressivement l'évolution de nos connaissances sur le monde au cours de l'histoire. L'exemple du concept d'aire illustre la façon dont ces deux processus s'articulent (voir l'encadré page ci-contre).

Ce procédé de redéfinition des unités a commencé à se déployer avec l'ébauche du système métrique, qui visait à promouvoir, dans le sillage de la Révolution française, un système d'unités communes « à tous les temps, à tous les peuples ». C'est en effet sur le fond de l'adoption du mètre, du kilogramme et de la seconde que Joseph Fourier a pu passer, dans sa *Théorie analytique de la chaleur* (1822), des équations abstraites de la mécanique rationnelle du XVIII^e siècle, dont les expressions, dites abrégées, étaient juste des relations de proportion réduites en équations (voir l'encadré ci-contre), à de véritables équations mathématiques entre mesures, faisant intervenir des constantes physiques susceptibles d'avoir la même signification pour tous.

Aussi n'est-ce qu'à partir du XIX^e siècle que les physiciens ont pu se mettre à mesurer des « constantes physiques » – qu'il s'agisse de constantes renvoyant à la propriété d'un système physique donné, variables de l'un à l'autre comme la masse volumique de telle substance, ou de constantes universelles valables pour tous les systèmes – et que l'activité de mesure de précision a pris son essor.

LE TOUR DE FORCE DE GAUSS

La mesure de la constante de la gravitation universelle G est l'un des innombrables fruits de cette « avalanche de nombres », comme la nomme l'épistémologue canadien Ian Hacking. C'est en effet fort tardivement, au cours du XIX^e siècle, que cette constante fut explicitement dégagée. Il fallait pour cela que la deuxième loi de Newton, qui exprimait au départ une simple proportionnalité entre force et variation de la quantité de mouvement, fût tout d'abord écrite sous la forme que nous connaissons : celle de l'équation fondamentale de la dynamique $F = MA$ liant la force F appliquée, la masse M du mobile et son accélération A .

L'histoire de cette réécriture est complexe. Mais si l'on s'en tient à l'étape décisive, accomplie par Carl Friedrich Gauss au début du XIX^e siècle, l'on peut voir dans cette équation entre grandeurs l'aboutissement d'un procédé analogue à celui que nous avons décrit pour l'aire. Gauss a cessé de considérer la force comme une grandeur indépendante, mesurée relativement à une unité propre de même nature (par exemple, le kilogramme-force), pour en faire une grandeur dérivée, définie à partir de la masse et de l'accélération, et dont l'unité devint

DES ÉQUATIONS SANS RÉALITÉ TANGIBLE

Au XVIII^e siècle, les lois de la mécanique rationnelle, énoncées sous forme de phrases, furent transcrites en équations. Mais la signification de ces équations demeurait fort abstraite, car il n'existait pas encore d'unités communes à tous les usagers : « Il y a, dans la géométrie nouvelle, des expressions abrégées qui peuvent d'abord embarrasser ; par exemple celle-ci : la masse du Soleil étant supposée S , la force qu'il exerce à la distance r , sur une planète quelconque, est S/r^2 : il s'agit d'une force attractive, et on la suppose égale à une masse S divisée par le carré d'une distance ; or les forces, les masses et les distances sont des choses hétérogènes et de nature fort différente. On peut demander comment il peut y avoir égalité entre des choses si disparates. »

Jérôme Lalande, *Astronomie*, 1792

le kilogramme mètre par seconde carrée. Ce faisant, Gauss a mis fin à plus d'un siècle de débats sur la nature de la force: en devenant une simple grandeur dérivée, la force a perdu son caractère métaphysique de cause du mouvement.

C'est à partir de cette nouvelle conception de la force et de sa mesure que l'on écrit l'équation qui exprime la loi de gravitation universelle. L'équation numérique qui lie la mesure de la force d'attraction entre deux corps – c'est-à-dire désormais la mesure de MA (en kilogrammes mètres par seconde carrée) –, la mesure des masses m et m' des deux corps en présence et celle de la distance R qui les sépare détermine un coefficient numérique de proportionnalité entre les mesures qui se trouve être le même pour tous les systèmes mécaniques. Comme dans l'exemple de l'aire, on passe de l'équation empirique entre mesures à la loi de gravitation universelle entre grandeurs, $F = G mm'/R^2$, en faisant de ce coefficient numérique une constante fondamentale dimensionnée, la constante de la gravitation universelle G , mesurée en mètres cubes par kilogramme et par seconde carrée.

Gauss, puis Wilhelm Eduard Weber et James Clerk Maxwell à sa suite, ont étendu ce processus aux grandeurs de l'électricité et du magnétisme qui constituaient jusqu'alors un domaine complètement indépendant de la mécanique. D'une part, ils ont lancé la redéfinition de l'ensemble des grandeurs physiques à partir de leurs relations empiriques avec les grandeurs mécaniques dès lors que ces relations étaient admises comme lois. Et, d'autre part, simultanément, ils ont commencé à mettre en place un système d'unités reliant en un vaste réseau les unités dérivées des grandeurs physiques aux unités de base de la mécanique. Ces dernières étaient encore, à

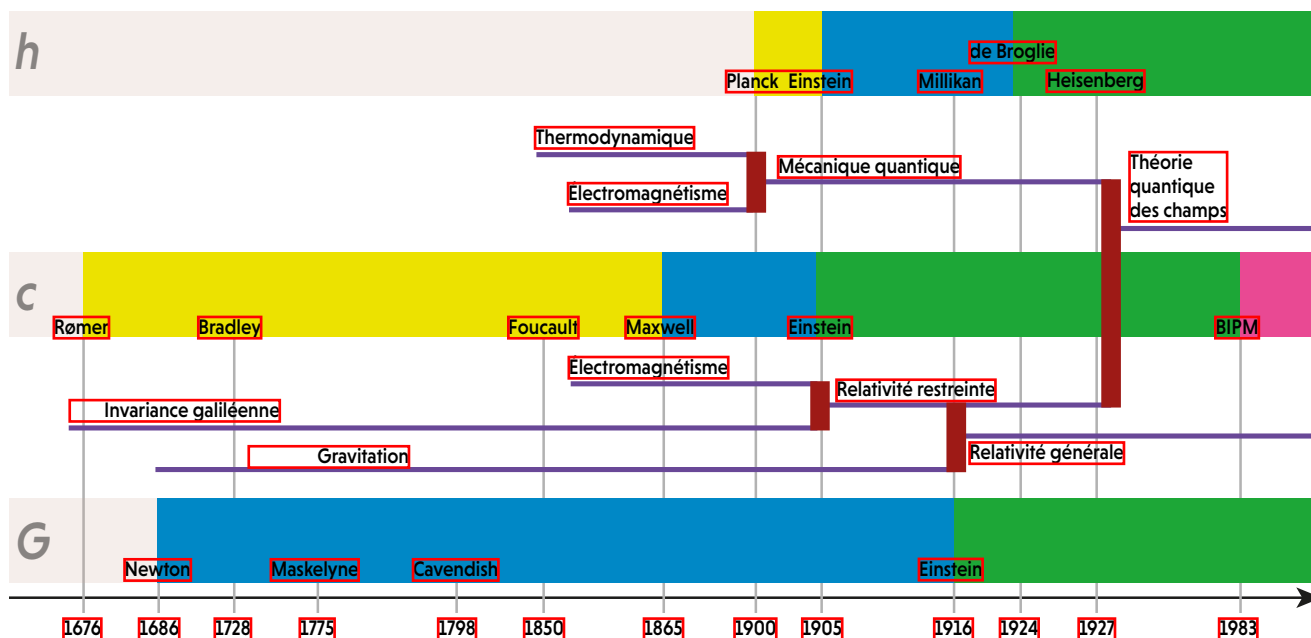
l'époque, définies de façon indépendante par un artéfact naturel ou artificiel (le méridien terrestre, puis le mètre des Archives pour la longueur, le kilogramme étalon pour la masse, la rotation de la Terre pour le temps). L'ensemble des concepts de la physique fut ainsi reconfiguré en termes «dynamiques». C'est en ce sens que l'on parle au XIX^e siècle d'une description mécanique de la nature.

LE STATUT DES CONSTANTES, TÉMOIN DE L'ÉTAT DE NOS CONNAISSANCES

Cependant, cette disposition à apparaître ou disparaître, semble-t-il à notre gré, lors du passage des relations de proportion aux équations entre mesures, puis aux équations entre grandeurs, donne aux constantes universelles un caractère passablement déconcertant. Comme le soulignait dans les années 1960 le physicien espagnol Julio Palacios dans son *Analyse dimensionnelle*, les constantes universelles apparaissent dans les lois physiques sans avoir été ni qualitativement ni quantitativement définies au préalable; elles ne désignent ni des attributs des corps, qui seraient variables de l'un à l'autre, ni des grandeurs physiques, car elles se présentent toujours avec la même valeur; et leur existence même apparaît de surcroît précaire puisqu'elles semblent dépendre du choix conventionnel de nos unités. Comment pourraient-elles représenter des propriétés invariantes caractéristiques de l'espace, de la matière ou de l'Univers?

Ces remarques cessent d'être déconcertantes si, au lieu d'envisager les constantes fondamentales dans une perspective ontologique, l'on prend acte, à la suite de Jean-Marc Lévy-Leblond, de leur évolution au cours de l'histoire. En 1977, ce physicien a proposé une

Au cours de l'histoire, les constantes fondamentales (ici la constante de Planck, h , la vitesse de la lumière, c et la constante de la gravitation universelle, G) jouent le rôle de synthétiseurs de concepts. D'abord juste des constantes spécifiques caractérisant un système physique particulier (en jaune), elles deviennent des constantes génériques caractérisant une classe générale de phénomènes (en bleu), puis des constantes universelles qui interviennent dans les lois fondamentales de la physique (en vert), et enfin des constantes de référence dont la valeur numérique est fixée et sert à définir une unité (en rose).



classification des constantes physiques qui met en exergue leur rôle épistémologique dans le développement de notre connaissance de la nature (voir la figure page ci-contre). L'itinéraire de la constante c illustre bien le destin d'une constante physique, qui est de gravir les échelons de cette classification, pour finalement être assimilée à une simple constante de conversion.

Avec la relativité restreinte, la vitesse de la lumière a atteint le stade ultime des constantes

La constante c fut tout d'abord introduite comme une constante spécifique, caractérisant l'une des propriétés d'une entité physique particulière: la lumière. Elle est devenue une constante générique lorsque les travaux de Maxwell ont montré que cette propriété caractérisait toute une classe de phénomènes: c est la vitesse dans le vide de l'ensemble des ondes électromagnétiques. Enfin, elle a acquis le statut de constante universelle avec la relativité restreinte, qui en a fait une constante caractéristique de la structure de l'espace-temps, liée à l'invariance des lois de la physique lorsque l'on passe d'un référentiel galiléen à un autre. C'est alors seulement que la constante c a pu atteindre le stade ultime de la classification: la valeur de c , jusqu'alors déterminée par l'expérience, a été fixée sans incertitude.

Comme le souligne Jean-Marc Lévy-Leblond, et comme dans l'exemple de l'aire, ce geste synthétise plusieurs concepts, ici ceux d'espace et de temps, combinés dans l'expression de l'intervalle d'espace-temps: $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta l)^2$. Les grandeurs d'espace et de temps cessent d'avoir une signification objective lorsqu'on les prend séparément; l'objectivité est attachée à leur combinaison au sein de l'intervalle d'espace-temps, seul à être invariant par changement de référentiel galiléen.

Cette synthèse se traduit par une redéfinition de l'unité de longueur: c'est à partir de la forme prise par l'intervalle d'espace-temps pour les ondes électromagnétiques, $\Delta l = c\Delta t$, que l'on a redéfini le mètre, en 1983, à l'aide de l'unité de temps et de la valeur, devenue fixe, de c . De la

même manière, la réforme imminente du système international consacra, en fixant k , la constante de Boltzmann, la synthèse des concepts de température et d'énergie. Et la constante de Planck, h , une fois fixée en conjonction avec c , entérinera un principe de la physique quantique – la dualité onde-corpuscule – selon lequel tous les objets physiques présentent à la fois des propriétés d'ondes et de corpuscules.

La valeur de c a été gelée à partir de sa valeur expérimentale, mesurée dans le système d'unités en vigueur avant la redéfinition, et non pas prise égale à un, comme dans l'exemple de l'aire, et comme le font souvent les théoriciens – un tel choix eût exigé la conversion de toutes les mesures de longueur effectuées avant la redéfinition. Les valeurs «commodes» des constantes choisies, que ce soit pour la redéfinition du mètre, ou celles, imminentes, de la masse, de la température, de l'ampère et de la mole, sont celles qui assurent la continuité avec les mesures antérieures.

PUIS LES CONSTANTES S'ÉVANOUISSENT

La constante c (et bientôt, avec elle, les constantes k et h) prend ainsi le chemin d'autres constantes qui ont aujourd'hui sombré dans l'oubli, comme la constante mécanique de la chaleur J . Initialement déterminée par l'expérience, cette constante liait au XIX^e siècle le travail mécanique et la chaleur. Vers la fin du XIX^e siècle, elle est devenue une simple constante de conversion entre les joules et les calories (1 calorie = 4,18 joules), entérinant l'idée que la chaleur n'est qu'une forme d'énergie: ainsi reconnaît-on que deux grandeurs, initialement tenues pour être de nature différente, renvoient en fait à la même réalité physique. Une multitude de constantes fondamentales, rendues désuètes par l'unification progressive des concepts physiques, ont ainsi été enfouies et rendues invisibles dans la trame de la physique telle qu'elle se présente à nous aujourd'hui.

Mais comment s'opèrent ces reconfigurations? On pourrait croire qu'elles découlent en quelque sorte naturellement du déploiement interne de la science et sont entérinées par une sorte de *fiat*. Mais, pour peu qu'on les regarde de près, ces processus révèlent au contraire la complexité des activités pratiques mises en œuvre au cours de l'histoire pour stabiliser l'écheveau des avancées empiriques dans un corps de connaissances et d'actions communes.

La redéfinition des unités engage des opérations de nature très différente. Mesurer la valeur d'une constante dans des unités déjà établies et redéfinir l'une de ces unités après avoir fixé la valeur de la constante ne sont pas du tout des tâches symétriques. La première relève de

➤ l'expérimentateur, la seconde du métrologue. Elles ne s'inscrivent dans aucune circularité; de fait, la valeur de la constante qui est fixée et utilisée dans la redéfinition d'une unité n'est pas une valeur obtenue par la mesure! Voyons cela de plus près.

Le travail expérimental a de multiples facettes. Certains expérimentateurs utilisent les constantes physiques sans chercher à les mesurer. Par exemple, ils testent des modèles ou des théories en comparant la valeur d'une grandeur obtenue dans le modèle testé, calculée en utilisant des constantes physiques adéquates – et en particulier des constantes fondamentales disponibles dans des tables – à la valeur de cette même grandeur mesurée dans leur expérience. D'autres, en revanche, cherchent à mesurer avec la meilleure exactitude possible certaines quantités ou constantes physiques de manière à constituer les tables de valeurs utilisées par les expérimentateurs engagés dans la validation des modèles et des théories. Il s'agit par exemple de mesurer h , la constante de Planck, avec la meilleure exactitude possible.

DE L'EXPLORATEUR AU MÉTROLOGUE

Ce type de travail relève de l'exploration, car il engage une confrontation directe à la nature. Ces expérimentateurs cherchent à ajuster leur résultat au monde sans être guidés par une attente, sans savoir ce qu'ils «devraient» obtenir. Aussi leur résultat est-il irrémédiablement affecté d'une incertitude qu'ils s'efforcent d'évaluer, mais qui reste toujours susceptible d'être entachée d'une erreur systématique inconnue. Et, de fait, des désaccords apparaissent entre les résultats des différents laboratoires qui mesurent la même grandeur ou la même constante. Mais alors, comment choisir les valeurs qui figureront dans les tables de constantes physiques?

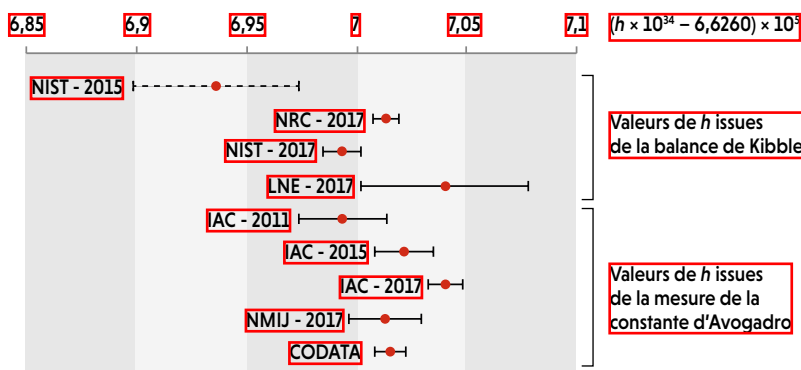
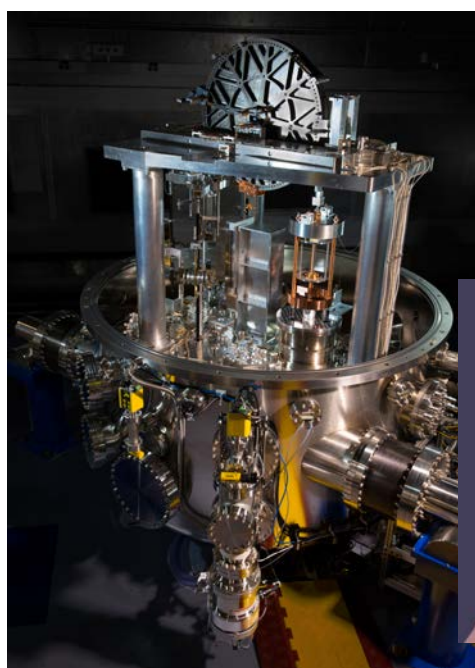
C'est simple: ces valeurs ne sont pas directement établies à partir des résultats de mesure obtenus dans les laboratoires, pas plus que celles destinées à tenir lieu de référence dans le cadre de la réforme du système international! Ces tables sont constituées par un travail métrologique qu'effectue un comité international de physiciens et de métrologues, le Committee on data for science and technology (Codata), créé en 1966. Ce comité rassemble les résultats expérimentaux «exploratoires» issus des laboratoires les plus avancés dans le monde. Ces laboratoires fournissent soit directement les valeurs des constantes cherchées, soit, plus généralement, des mesures expérimentales à partir desquelles on déduit les constantes cherchées en utilisant des relations théoriques admises.

Dans tous les cas, les valeurs des constantes physiques fondamentales peuvent être obtenues

par plusieurs voies distinctes qui mobilisent des principes de mesure et des domaines de la physique fort différents. Ainsi, certains laboratoires obtiennent leur valeur de la constante de Planck en comparant la force de pesanteur à une force électromagnétique dont la mesure est reliée à la constante de Planck – une expérience dite de la balance de Kibble. Mais d'autres déduisent leur valeur de cette même constante en évaluant le nombre d'atomes dans une sphère parfaite de silicium pur à l'aide de mesures du volume de la sphère et de la maille de sa structure cristalline. Ce nombre leur fournit une estimation du nombre d'Avogadro, dont ils déduisent une valeur de la constante de Planck à l'aide d'une équation faisant intervenir diverses autres constantes physiques comme la vitesse de la lumière et la masse de l'électron (voir la figure ci-dessous).

En général, d'une méthode à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, les valeurs issues de ces différentes voies, accompagnées de leur incertitude de mesure, ne sont guère compatibles: l'on obtient plusieurs valeurs pour chaque constante. Le travail du Codata consiste à prendre en

Ces dernières années, plusieurs laboratoires ont fourni une valeur pour h , la constante de Planck, en utilisant soit une balance de Kibble (à gauche celle de l'Institut américain des normes et de la technologie ou NIST), soit une mesure du nombre d'Avogadro à partir d'une sphère de silicium (à droite). La valeur qui a été choisie par le Codata est un ajustement à partir des valeurs qu'il a retenues après délibération, soit toutes celles indiquées, sauf celle en pointillé (en bas).



BIBLIOGRAPHIE

I. Folger, Vers une redéfinition du kilogramme, *Pour la Science*, n° 473, pp. 62-69, mars 2017.

R. Davis, « Le nouveau kilogramme sera plus pratique », *Pour la Science*, n° 473, pp. 70-71, mars 2017.

T. J. Quinn, From Artefacts to Atoms. The BIPM and the Search for Ultimate Measurement Standards, Oxford university press, 2012.

J.-P. Uzan et R. Lehoucq, Les Constantes fondamentales, Belin, 2005.

J.-M. Lévy-Leblond, On the conceptual nature of the physical constants, *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 7(2), pp. 187-214, 1977.
En français : <https://bit.ly/2QnQd5g>

ET LA SECONDE ?

Toutes les unités du système international (hormis la mole) vont bientôt toutes découler d'une seule unité, la seconde. Mais la définition de celle-ci, fondée sur les propriétés d'un atome, reste tributaire de nos connaissances actuelles. Pour l'instant, on ne sait pas mesurer G , la constante fondamentale de la gravitation, avec une précision suffisante pour redéfinir la seconde à partir de cette constante. Mais d'autres pistes sont à l'étude...

compte ces désaccords en déterminant, sur la base des résultats expérimentaux disponibles, la meilleure estimation possible de chaque constante. Or ce travail met en œuvre une rationalité non seulement théorique, mais aussi pratique. Confrontés à des résultats expérimentaux qui ne s'accordent pas entre eux, obtenus par une pluralité d'agents humains, les membres du Codata doivent tout d'abord passer par une phase de délibération.

Cette délibération est fondée sur un examen critique de la qualité des différentes expériences et des incertitudes qui accompagnent leurs résultats. Certes, les considérations scientifiques y sont au premier plan, mais pas seulement. Le Codata doit en effet arbitrer entre plusieurs objectifs concurrents : comment traiter les discordances ? Que faire des valeurs isolées ? Faut-il opter pour le consensus et retenir toutes les valeurs, quitte à élargir l'incertitude du résultat ? Ou plutôt réduire les incertitudes et s'exposer au dissensus et à l'erreur en écartant les valeurs discordantes ? Le conflit ne peut être tranché par la seule raison théorique, car il appelle à établir une hiérarchie entre des valeurs humaines. La délibération comporte donc nécessairement des aspects subjectifs et politiques. C'est seulement à l'issue de cette étape délibérative que commence la phase d'estimation calculatoire, où l'on déduit des résultats expérimentaux retenus la valeur de la constante, en appliquant une méthode d'ajustement de type méthode des moindres carrés.

Dans ce travail d'ajustement, l'objectif des métrologues du Codata est à l'opposé de celui des expérimentateurs qui testent les théories et des explorateurs : lorsqu'ils testent des théories, les expérimentateurs s'efforcent d'ajuster celles-ci au monde pour le décrire. Les explorateurs cherchent eux aussi à ajuster leurs valeurs au monde dans un but descriptif. Tandis que les métrologues imposent à des constantes de satisfaire les relations que dictent les théories admises, et ajustent ainsi au contraire les valeurs numériques des constantes aux théories existantes. L'objectif des métrologues du Codata est non pas de décrire la réalité, mais de fournir à tous les agents de par le monde des repères communs visant à régler leurs activités de manière à ce que les expériences, les actions et les décisions qu'ils sont susceptibles d'élaborer de façon indépendante s'accordent et soient compatibles. Par là, ils s'assurent en même temps de la cohérence de nos théories entre elles. Ainsi, l'ajustement mis en œuvre dans le processus d'estimation revêt-il une fonction pratique de coordination, et non pas une fonction descriptive attachée au monde tel qu'il est.

Cependant, la table des valeurs « recommandées » des constantes fondamentales est provisoire : le Codata la révisé tous les quatre

ans afin de tenir compte des avancées théoriques et expérimentales. Il en ira tout autrement pour les valeurs des constantes h , k , e et N_A dont le Codata a annoncé les valeurs lors d'une séance extraordinaire en septembre 2017 : ces valeurs sont désormais fixées, sans incertitude, et serviront, après la ratification définitive de la réforme lors de la Conférence générale des poids et mesures, du 13 au 16 novembre 2018, à redéfinir les unités de masse, de température, de courant électrique et de quantité de matière.

Le travail d'ajustement se prolonge ainsi par un travail normatif, un acte législatif qui participe de l'édiction d'une norme. Là encore, la démarche est opposée à celle des expérimentateurs qui testent les théories : ici, le monde est appelé à s'ajuster aux normes – non pas certes le monde réel muet, indépendant de nous, mais le monde conceptualisé, mis en forme, dans lequel se déploie l'action humaine, résultat d'un travail tout à la fois normatif, expérimental et institutionnel ; le monde social et technique construit par nous et dans lequel nous pouvons organiser et coordonner nos actions.

DEUX VISIONS, DEUX MONDES

Finalement, la réforme du système international articule deux directions d'ajustement, l'une théorique, l'autre pratique, dont la conjugaison éclaire le processus de développement de nos connaissances. D'un côté, les expérimentateurs explorateurs cherchent à s'ajuster au monde. Ils font des erreurs systématiques inassignables puisque nous sommes tous dans l'ignorance du monde réel. De l'autre, les métrologues transforment, par un travail spécifique, les tentatives de description des explorateurs en directives auxquelles devra se conformer le monde technique et social humain afin que les usagers puissent y coordonner leurs actions.

Les deux types d'ajustement ne sont pas étanches. D'un côté, l'explorateur se laisse inévitablement guider par les résultats des autres, et pas seulement par le monde réel. Ses nouveaux résultats de mesure ont ainsi tendance à se rapprocher de ceux déjà obtenus du simple fait qu'il a connaissance des résultats antérieurs. Cet effet nuit à la recherche des erreurs systématiques inconnues en masquant les désaccords qui auraient pu surgir entre les résultats. D'un autre côté, les actions des usagers, toutes charpentées qu'elles soient par l'infrastructure du monde humain construit, sont néanmoins bel et bien plongées dans le monde réel et sont toujours susceptibles de mettre au jour un écart irréductible au monde tenu pour vrai.

C'est ainsi que du nouveau, de l'inédit, peut jaillir, telle une étincelle, du frottement entre les deux mondes, jamais parfaitement ajustés l'un à l'autre. ■

L'ESSENTIEL

> Pour l'heure, l'empreinte écologique des voitures électriques est presque aussi négative que celle des voitures à moteur thermique.

> De grandes quantités de gaz à effet de serre sont émises lors de la fabrication des batteries des véhicules électriques. De plus, la production de l'électricité

nécessaire à la recharge des batteries est souvent associée à d'importantes émissions, notamment en Allemagne.

> Le bilan ne s'améliorera que lorsqu'on produira davantage d'électricité « propre ».

> D'autres formes de pollution que les gaz à effet de serre sont aussi à prendre en compte.

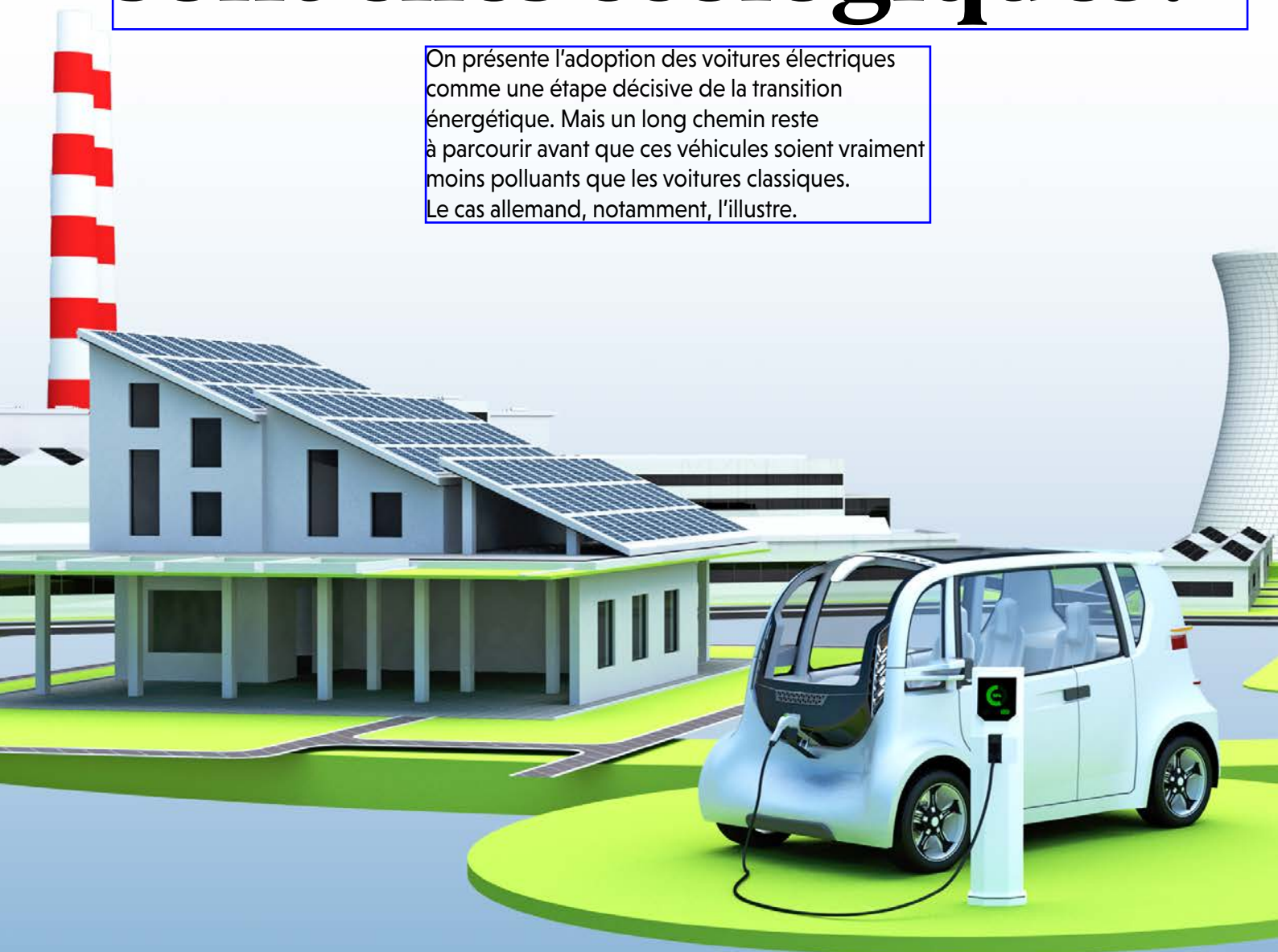
L'AUTEUR



CHRISTOPHER SCHRADER
journaliste scientifique à Hambourg, en Allemagne

Les voitures électriques sont-elles écologiques?

On présente l'adoption des voitures électriques comme une étape décisive de la transition énergétique. Mais un long chemin reste à parcourir avant que ces véhicules soient vraiment moins polluants que les voitures classiques. Le cas allemand, notamment, l'illustre.



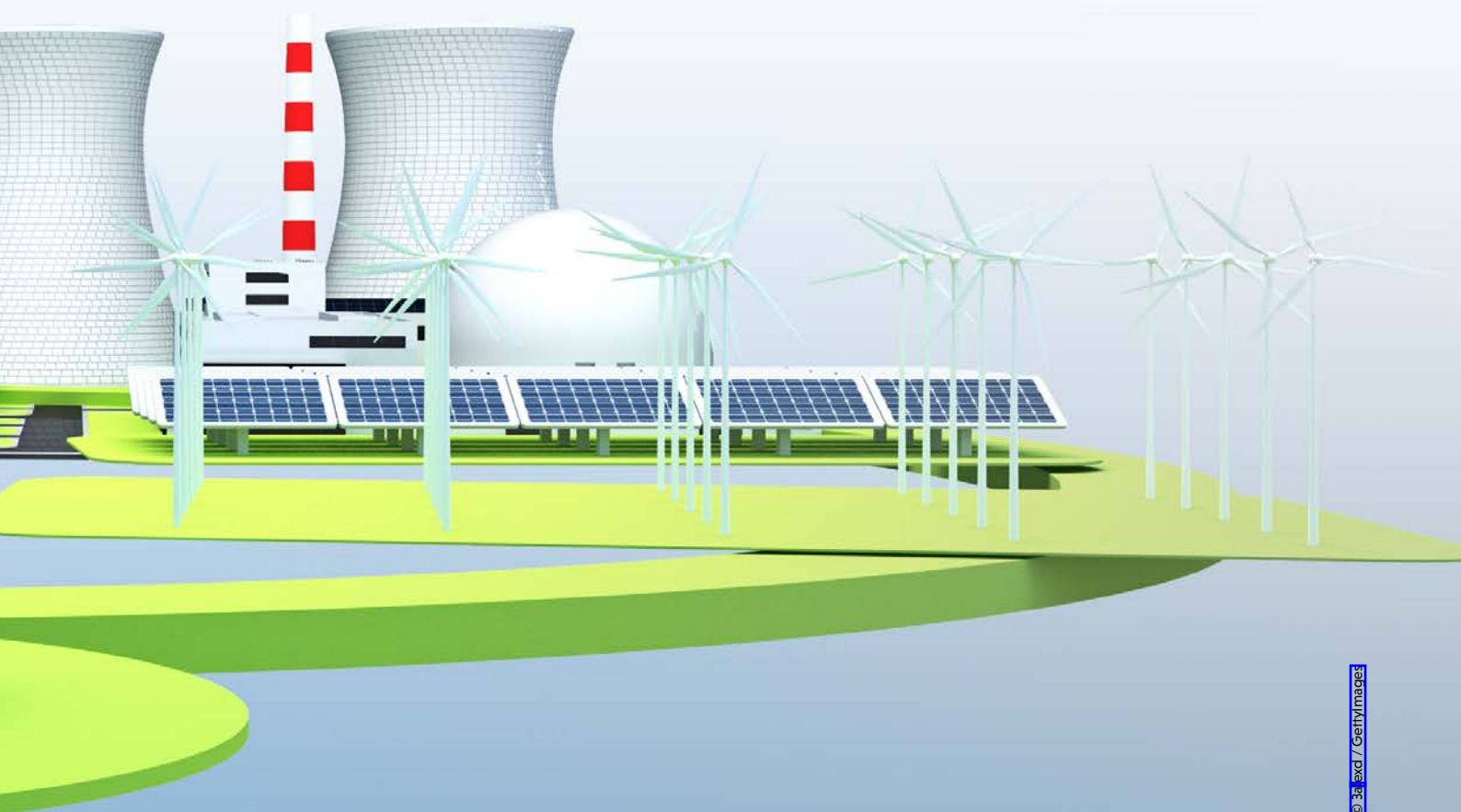
Un passant regardant une voiture électrique circuler peut avoir l'impression que l'on roule désormais sans émettre de gaz à effet de serre. Plusieurs gouvernements européens placent les véhicules électriques au centre de leur stratégie de décarbonation et les classent comme propres. Ainsi, dans son « plan climat », le gouvernement français prévoit de « mettre fin à la vente des voitures émettant des gaz à effet de serre d'ici à 2040 ». L'électromobilité « propre » serait-elle donc pour bientôt ?

Hélas non ! Les voitures électriques sont aussi à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Certes, les Tesla, Smart, Golf et autres BMW électriques n'ont pas de pot d'échappement, mais elles consomment de l'électricité qui, elle, n'est pas « verte ». Leur propreté dépend donc de la part d'électricité provenant de sources renouvelables dans le pays où elles roulent. En 2017, en Allemagne, l'électricité provenait à 51% de centrales thermiques et à 31,1% de sources d'énergie renouvelables. La même année en France, plus de 72,3% de l'électricité ont été produits par des centrales nucléaires, tandis que la part des énergies renouvelables

n'atteignait que 16,1%. L'arrivée d'électricité provenant de sources d'énergie renouvelables réduit, mais ne fait pas disparaître, les effets climatiques des voitures électriques. « L'électromobilité a un coût écologique », assène Eckart Helmers, chimiste à l'université de Trèver, en Allemagne, qui s'est spécialisé dans le bilan écologique des véhicules électriques. « Faire circuler de tels véhicules d'au moins 800 kilogrammes implique une émission notable de dioxyde de carbone (CO₂) ».

UN BILAN ÉCOLOGIQUE LIÉ À DE NOMBREUX FACTEURS

Établir le bilan écologique d'une voiture électrique est complexe. Ici, on examinera cette question en se concentrant sur les seules émissions de gaz à effet de serre associées à la production et à l'usage d'une voiture électrique au cours de son cycle de vie ; on laissera de côté nombre de formes de pollutions périphériques au transport automobile, telles les effets de l'extraction pétrolière sur l'environnement ou encore l'élimination des batteries usagées. La question sera étudiée en s'appuyant sur les calculs que l'on fait dans mon pays, l'Allemagne. Même si, en France, où le mix énergétique est différent, d'autres calculs



doivent être proposés (voir l'encadré page 66), le cas allemand et les raisonnements menés sont caractéristiques de cet aspect de la transition énergétique, et instructifs.

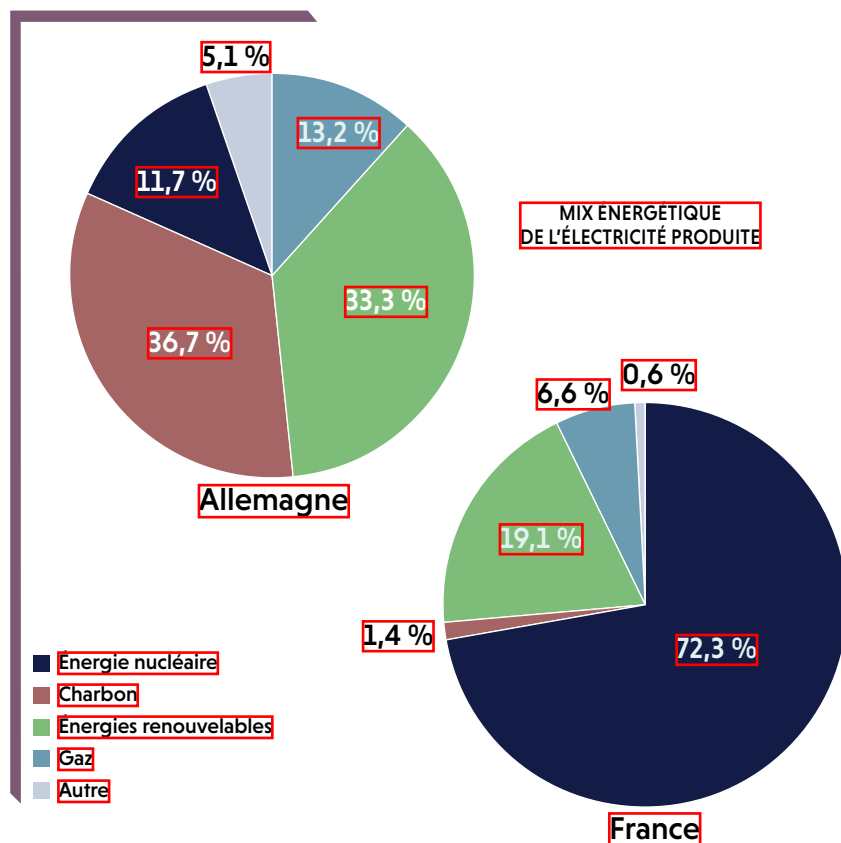
Aucun bilan écologique sérieux ne semble indiquer une innocuité climatique de l'électromobilité. Dans le meilleur des cas, les émissions de gaz à effet de serre associées à la production et à l'utilisation des véhicules électriques sont inférieures à celles des voitures à carburant. Dès lors, la bonne question à se poser est celle-ci : une fois leur usage terminé, les voitures électriques ont-elles un meilleur bilan écologique que les voitures classiques ?

Ce n'est pas facile à déterminer, tant les facteurs entrant en ligne de compte sont nombreux : consommation du véhicule, origine de l'électricité utilisée, effet du climat sur la batterie, puissance et durée de vie du véhicule, politique vis-à-vis du transport électrique... Tous ces facteurs déterminent le bilan écologique du cycle de vie. D'où les avis contrastés des experts : pour Eckart Helmers, l'électromobilité est le « plus grand progrès écologique dans le secteur automobile depuis 100 ans », tandis que pour Dieter Teufel, qui dirige l'Institut pour l'environnement et la prévision à Heidelberg (l'*Umwelt- und Prognose-Institut* ou UPI) « les voitures électriques aggravent beaucoup le problème climatique ».

LES BATTERIES, UN POINT CENTRAL

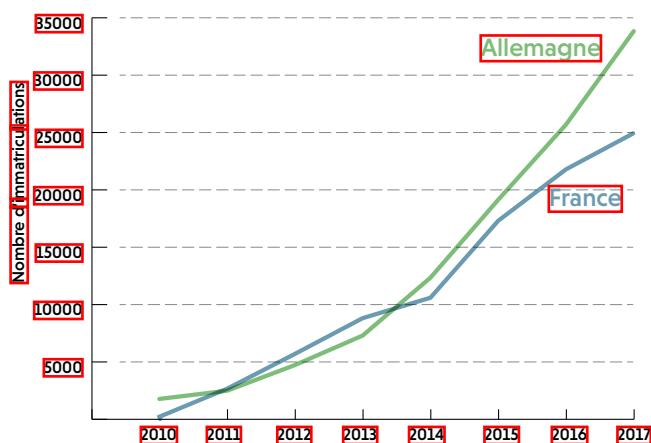
De temps à autre, une nouvelle étude met en avant tel ou tel aspect et l'image de la voiture électrique dans le public évolue. Par exemple, au cours de l'été 2017, l'institut suédois de recherche sur l'environnement (IVL) a publié de nouvelles données sur la production des batteries. L'encre en était à peine sèche que le puissant hebdomadaire *Der Spiegel* titrait déjà « Les illusions électriques » et évoquait carrément une « fraude écologique ». Peu après, l'Öko-Institut, une association allemande de recherche sur l'environnement, présentait un rapport sur les moyens de renforcer l'intérêt écologique de l'électromobilité. Le ton impliquait que cet intérêt ne peut absolument pas être mis en doute... Aussi, en novembre 2017, un groupe de quinze experts choqués que la discussion sur l'électromobilité semble se dérouler « sans tenir compte des lois de la physique » s'est rassemblé autour de Klaus Beckmann, ex-directeur de l'institut allemand d'urbanisme, pour mettre de l'ordre dans les idées en publiant une lettre ouverte.

Tout bilan écologique commence par un examen de ce qui se passe en production. Les véhicules électriques sont d'une construction bien plus complexe que les voitures classiques. Quoique de façon discrète, Volkswagen et BMW l'expliquent dans les brochures



environnementales accompagnant la e-Golf et la BMW i3 : il en ressort que la fabrication de ces véhicules entraîne l'émission de deux fois plus de CO₂ que celle d'une voiture classique comparable. Concrètement, 9 tonnes sont émises dans le cas de la Volkswagen et 4 dans celui de la BMW. La différence entre ces deux valeurs est liée à la fabrication des batteries. Dans l'étude de l'IVL mentionnée plus haut, on évalue les émissions dues à leur production entre 150 et 200 kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure d'électricité stockée (certains des divers gaz émis ont, à masse égale, un effet de serre plus puissant que le CO₂, d'où la notion d'« équivalent CO₂ » pour tenir compte de cette réalité).

D'autres chercheurs parviennent à des valeurs comparables. Ainsi, dans une étude de 2017, l'équipe dirigée par Jens Peters, de l'Institut de technologie de Karlsruhe, trouve que la fabrication des batteries entraîne l'émission de 110 kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure de stockage. Chargé par l'Agence fédérale de l'environnement de procéder aux mêmes estimations, l'Ifeu (*Institut für Energie und Umweltforschung*, l'Institut pour la recherche sur l'énergie et l'environnement de Heidelberg) arrive à 140 kilogrammes par kilowattheure de stockage. Une équipe dirigée



LES IMMATRICULATIONS DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

De plus en plus de véhicules électriques roulent sur les routes de France et d'Allemagne, pour prendre ces deux exemples (voir le graphique ci-contre). La signification de cette évolution est cependant différente en Allemagne, où la transition énergétique est plus avancée, mais où l'on produit 48 % de l'électricité en brûlant des carburants fossiles, et en France, où l'on n'en brûle que 10,2 %, mais où 76,1 % de l'électricité est d'origine nucléaire.



par Linda Ellingsen, écologue à l'université des sciences et technologies de Norvège, trouve un peu plus de 170 kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure.

La Golf électrique, par exemple, disposait à l'origine d'une batterie de seulement 24 kilowattheures; cela correspond à des émissions comprises entre 3 et 5 tonnes d'équivalent CO₂, soit à peu près la valeur mentionnée dans la présentation dont, en 2014, Volkswagen s'est servi pour vanter sa voiture. Mais la capacité de stockage de la même

voiture est désormais passée à 36 kilowattheures, ce qui implique une augmentation de moitié des émissions de gaz à effet de serre associées à la production de ses batteries.

Si le principe chimique des batteries n'a pas d'impact notable sur les émissions, ce n'est pas le cas de leur provenance géographique, puisque les usines qui les fabriquent consomment de l'électricité. Beaucoup de batteries sont fabriquées en Chine, où une grande part de l'électricité est produite dans des centrales thermiques au charbon particulièrement polluantes, ce qui a un effet très négatif sur le bilan écologique des voitures. « Du reste, tout dépend de la région chinoise de provenance des batteries, précise Peter Kasten, de l'Öko-Institut. Au sud de la Chine, des sources d'énergie renouvelables fournissent un tiers de l'électricité; au nord, ce sont surtout des centrales au charbon. »

En résumé, les batteries pour voitures électriques ont une très forte empreinte écologique: l'émission associée à la production d'une batterie représenterait en moyenne quelque 5 tonnes d'équivalent CO₂, ce qui équivaut à l'émission due à la combustion de 1900 litres d'essence ou de 1670 litres de diesel. Cela implique que les véhicules thermiques les plus économes ont quelque 40 000 kilomètres

Fabriquer une batterie équivaut, en moyenne, à brûler 1900 litres d'essence

➤ d'avance avant que leurs émissions n'atteignent celles de la seule production d'une voiture électrique.

Notons que dans cette comparaison, les émissions de gaz à effet de serre de ce que l'on nomme la « chaîne amont » (c'est-à-dire, dans le cas des carburants fossiles, de l'extraction, du raffinage et du transport à la pompe) ont été prises en compte. À cet égard, le Centre de recherche sur l'économie de l'énergie de Munich (*Forschungsstelle für Energiewirtschaft*) a publié des chiffres précis: la production de 1 kilowattheure d'énergie par combustion de diesel entraîne l'émission de 299 grammes de CO₂, dont 33 grammes d'émissions amont. Pour l'essence, les chiffres sont de 295 et de 61 grammes respectivement. Lorsqu'on brûle 1 litre d'essence, un peu moins de 9 kilowattheures d'énergie sont libérés, contre près de 10 kilowattheures dans le cas du diesel.

L'EMPREINTE CARBONE DE L'ÉLECTRICITÉ

Quiconque croit que les voitures électriques n'émettent pas de gaz à effet de serre commet une erreur de raisonnement: il ou elle suppose que ces véhicules sont rechargés à l'électricité verte, c'est-à-dire à l'électricité produite par des sources d'énergie renouvelables. Le courant du réseau ne saurait cependant être séparé en une part « verte », une part « carbonée », une part « nucléaire », etc. Un mélange de courants de diverses et nombreuses provenances circule dans les câbles! Selon l'Agence allemande fédérale de l'environnement (l'*Umweltbundesamt*), en 2016, en Allemagne, chaque kilowattheure de recharge était associé à l'émission de 527 grammes de CO₂ en moyenne. À chaque recharge, une Ioniq de Hyundai émet ainsi, indirectement, 60 grammes de CO₂ par kilomètre parcouru, une Opel Ampera-e 76 grammes, une Citroën Berlingo 93 grammes, la Ford Focus Electric 81 grammes et le modèle S de Tesla pas moins de 125 grammes (*pour l'équivalent en France, voir l'encadré ci-contre*).

En l'absence de données fiables sur la consommation électrique dans le trafic réel, on doit fonder ce genre de calcul sur les consommations annoncées par les constructeurs. Mais on peut supposer que ces derniers enjolivent les chiffres, comme ils l'ont si souvent fait avec les véhicules thermiques, dont les consommations réelles se révèlent souvent supérieures d'un tiers à celles annoncées... Les données se rapportant aux véhicules hybrides doivent aussi être considérées avec prudence: derrière les déclarations des constructeurs, il y a parfois une hypothèse jamais vérifiée, quant à la fréquence à laquelle l'utilisateur recharge vraiment ses batteries.

On peut cependant affirmer que, à l'usage, les véhicules électriques ont un impact

ET EN FRANCE?

L'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) souligne dans son document *Le véhicule électrique dans la transition écologique en France* (2017) que les « impacts de ce véhicule sur le climat et l'environnement varient en fonction du mix électrique qui est utilisé pour la charge des véhicules. » Au pire, ce mix électrique sera celui du réseau général, dont l'empreinte carbone en 2017 était de 119 grammes de CO₂ par kilowattheure (au lieu de 527 g/kWh en Allemagne).

Cette empreinte carbone implique qu'en appliquant le même principe de calcul que Christopher Schrader dans son article, à chaque recharge de sa batterie, une Ioniq de Hyundai est responsable de l'émission de quelque 13 grammes par kilomètre (60 outre-Rhin), une Opel Ampera de 18 grammes (76 outre-Rhin), une Citroën Berlingo de 93 grammes (60 outre-Rhin), une Ford Focus de 18 grammes (81 outre-Rhin).

et un modèle S de Tesla de seulement 28 grammes (125 outre-Rhin). Ces bons chiffres résultent des 72,3 % d'électricité d'origine nucléaire, produite avec relativement peu d'émissions de CO₂ (de l'ordre de 20 à 30 g/kWh). Mais il ne faut pas oublier que la production d'électricité d'origine nucléaire a ses propres inconvénients, notamment celui d'engendrer des déchets nucléaires dangereux et difficiles à gérer.

Par ailleurs, en 2017, 24 910 voitures électriques ont représenté de l'ordre de 1 % des 2 649 628 véhicules neufs immatriculés en France; à ce rythme-là, il faudra environ 450 ans avant que le parc automobile français (quelque 30 millions de véhicules) soit électrique à 99 %...

FRANÇOIS SAVATIER

climatique inférieur à celui des voitures classiques. En effet, si les petits véhicules thermiques les plus économiques émettent un peu moins de 100 grammes de CO₂ par kilomètre, tous les autres se situent dans une fourchette à trois chiffres, parfois même au-dessus. Les véhicules électriques n'épargnent cependant pas à l'environnement autant d'émissions, mais seulement 20 ou 30, au maximum 40 grammes de CO₂ par rapport aux voitures à moteurs thermiques économiques. Les économies à trois chiffres ne sont possibles que dans la classe de



La Gigafactory du constructeur Tesla, aux États-Unis, est une immense usine de batteries lithium-ion conçue pour réduire nettement leur coût. Cette image est une représentation par ordinateur de l'immense installation, inachevée à ce jour.

© Tesla.com

luxe, dont fait partie la voiture de Tesla. Bien que la Tesla S ait, en termes d'émissions de CO₂, l'une des plus piètres performances parmi les véhicules électriques, elle ne se compare vraiment qu'aux tout-terrain utilitaires (les SUV) et aux voitures de sport dotées de moteurs thermiques. D'autres véhicules électriques de cette taille seront sans doute proposés bientôt. C'est pourquoi l'équipe d'experts de Klaus Beckmann souligne aussi qu'«il faut absolument limiter la taille et le poids des voitures particulières, même non électriques, et ce, au plus tard lors de leur électrification.»

Quoi qu'il en soit, avec le mix énergétique allemand actuel, l'étude des chiffres montre qu'étant donné les économies de CO₂ au kilomètre des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques de même catégorie, ce n'est qu'après environ 150 000 kilomètres qu'un véhicule électrique aura compensé l'empreinte écologique de 5 tonnes de CO₂ émises lors de la fabrication de ses batteries. En Allemagne, le conducteur moyen ne peut y parvenir qu'au bout de 10 à 12 ans.

La situation serait différente si l'on pouvait compter sur une véritable électricité verte. Il ne suffit pas pour cela de commander l'une des offres «vertes» des fournisseurs d'électricité, car le courant correspondant proviendra des mêmes centrales classiques, même s'il a été déclaré vert, par exemple à l'aide de certificats norvégiens (l'électricité norvégienne est verte car elle provient de barrages). D'une façon ou d'une autre, le mix énergétique reste le même: si l'on attribuait de l'électricité verte aux voitures, il faudrait

faire fonctionner le reste à l'aide d'électricité non verte: un jeu à somme nulle.

Pour améliorer la situation, il faudrait que l'électricité destinée au transport provienne d'éoliennes ou de parcs solaires construits à cet effet. C'est du moins ce que propose en Allemagne la Plate-forme nationale pour l'électromobilité (*nationale Plattform für Electromobilität*), un organe consultatif du gouvernement. La contrainte est très forte! Les sources d'énergie renouvelables ne pourraient être exploitées que pour le transport électrique et ne pourraient bénéficier d'aucune subvention ni d'aucun tarif préférentiel de rachat. Cette logique exclut aussi toute la production photovoltaïque des toits, qui existait déjà en Allemagne bien avant l'arrivée des voitures électriques.

L'ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE ÉOLIENNE OU PHOTOVOLTAÏQUE N'EST PAS PROPRE

Comprenant cependant l'intérêt de cette logique, certains constructeurs automobiles ont pris l'initiative d'alimenter le réseau avec de l'électricité propre pour la recharge des batteries. Dans l'un de ses rapports de 2017, l'Öko-Institut loue par exemple le fait que Daimler ait financé une éolienne et «informe activement ses clients sur l'électricité verte.» En menant cette démarche, l'institut délivre une sorte de certificat de bonne pratique aux acheteurs de la première génération des Smart électriques. «Il est peu probable que Daimler continue dans cette voie malheureusement», regrette Peter Kasten (Öko-Institut). C'est seulement lorsque le courant servant à propulser les voitures électriques ne proviendra que de telles installations dédiées que l'on pourra éviter les 527 grammes de CO₂ par kilowattheure du mix énergétique allemand en le remplaçant par le facteur d'émission réel de l'électricité produite avec la source d'électricité utilisée.

Pour autant, même avec de l'électricité entièrement verte, les émissions ne seraient pas entièrement nulles: selon l'Agence fédérale de l'environnement, 11 grammes de CO₂ par kilowattheure sont émis lors de la production d'énergie éolienne terrestre et 68 grammes lors de la production d'énergie photovoltaïque. Ces chiffres sont calculés d'après les émissions associées à la production, au transport et à la maintenance des cellules solaires et des supports, pales, mâts et autres engrenages des éoliennes. Les émissions dues à ces opérations sont ensuite réparties en fonction de la quantité d'énergie produite.

Si la batterie d'une Tesla S était effectivement chargée exclusivement avec de l'électricité provenant d'une éolienne construite spécialement à cette fin, il en résulterait l'émission de 3 grammes de CO₂ par kilomètre >



sur la route au lieu de 125 grammes. Et ceux qui, à l'avenir, équiperont le toit de leur maison de cellules solaires capables de fournir toute l'énergie d'une voiture n'émettraient plus que 10 grammes, au lieu des 76 grammes de CO₂ par kilomètre émis en rechargeant la batterie avec de l'électricité allemande de 2016.

Beaucoup d'écobilans sérieux présentent les voitures électriques rechargées avec de l'électricité allemande actuelle comme à peu près aussi polluantes que les voitures à moteurs thermiques économiques. Cependant, la Plate-forme nationale pour l'électromobilité et le ministère de l'Environnement accordent un avantage de 12 à 16% à la propulsion par batterie, et, dans une étude récente, Eckart Helmers considère les voitures électriques comme moins polluantes que les voitures thermiques. Selon lui, c'est déjà le cas si l'on tient compte du mix électrique allemand de 2013; or, depuis, les émissions par kilowattheure ont diminué de quelque 10%.

LES ÉTUDES SE SUIVENT ET NE SE RESSEMBLENT PAS

Dans un rapport publié en 2017, Dieter Teufel et son équipe de l'UPI donnaient un léger avantage écologique aux véhicules électriques. Récemment, seuls ses collègues de l'Ifeu attribuaient encore une meilleure note au diesel économique. Dans une étude de 2016, l'Agence fédérale de l'environnement montre par des calculs – que ses chercheurs ont mis à jour en août 2017 – que les véhicules électriques ont de l'avance si l'on suppose que la transition énergétique va se poursuivre. Les avantages écologiques de l'électromobilité ne seraient toutefois acquis que vers la neuvième année d'utilisation...

Ce qui sépare ces études tient à des détails: si l'on compare des véhicules de taille similaire, le diesel, qui émet plus de particules et d'oxydes d'azote, mais moins de CO₂ que l'essence, se rapproche des voitures électriques, du moins quand la batterie de celles-ci est assez importante. En revanche, lorsque c'est le nombre moyen de voitures immatriculées que l'on examine, alors l'influence des nombreuses voitures thermiques massives et surpuissantes se fait sentir: plus petites en moyenne, les voitures Tesla ont alors un avantage intrinsèque. Les présupposés des études et les années qui y sont prises en référence influent aussi beaucoup sur les conclusions. «Lorsque des travaux sont publiés, leurs hypothèses de départ sont souvent déjà dépassées, tant la situation évolue vite sur le marché des voitures électriques», pointe Peter Kasten.

Comme on l'a déjà mentionné, le bilan écologique est très différent si l'on ne recharge son véhicule électrique qu'avec de l'électricité verte produite par une installation spéciale.



Dans ce cas, les voitures électriques deviennent insurpassables, quels que soient les bilans existants. Selon une étude de l'Ifeu, une fois que l'on a tenu compte de tous les facteurs, rouler au diesel produit environ 190 grammes de CO₂ par kilomètre parcouru pendant le cycle de vie d'un véhicule, tandis qu'une voiture électrique alimentée à l'électricité éolienne n'en produit que 60 grammes.

Soit dit en passant, en Allemagne, ces chiffres portent en eux-mêmes une tentation: le pays pourrait améliorer son bilan carbone en réduisant les émissions sur la route à l'aide de ses éoliennes, et en passant sous silence les émissions importantes entraînées par la fabrication à distance – des batteries qu'il utilise. Où qu'ils soient produits, les gaz à effet de serre ont cependant le même effet sur le climat. Une telle approche n'aurait rien de sérieux.

DE NOMBREUX AUTRES FACTEURS À CONSIDÉRER

Nombre de facteurs modifient par ailleurs le bilan écologique des véhicules électriques. Des inconvénients se font jour, par exemple, si l'on souhaite que les voitures électriques aient une autonomie de 400 kilomètres au lieu des 150 à 200 kilomètres habituels. Pour ce faire, une batterie deux fois plus grosse est nécessaire, et il faudra parcourir un trajet irréaliste de 300 000 kilomètres pour compenser l'empreinte écologique initiale. En outre, un tel véhicule devra transporter une batterie deux fois plus lourde et consommera donc plus d'énergie.

En Allemagne, le climat, froid et brumeux pendant l'hiver, est un autre facteur à

La Chine est un important fabricant de batteries. Or une grande partie de son électricité, qui sert notamment à cette fabrication, est produite par des centrales thermiques au charbon. Cela détériore gravement le bilan écologique des véhicules électriques.

considérer. Le chauffage et le ventilateur du véhicule puiseront dans la batterie, alors que dans une voiture à moteur thermique, la chaleur utilisée pour chauffer l'habitacle est un sous-produit du fonctionnement du moteur thermique. C'est pour cette raison que des chercheurs de l'université technique de Munich ont envisagé sérieusement de chauffer l'habitacle en brûlant du bioéthanol.

Lorsque des millions de véhicules électriques seront en circulation, des problèmes surgiront aussi si ces voitures sont rechargées à un moment défavorable. L'augmentation de la demande en énergie à des moments où il y a peu d'électricité renouvelable disponible aurait un impact négatif sur le mix électrique. Les voitures devront donc être dotées d'un système intelligent de contrôle de la charge, qui communique avec le réseau électrique afin de déterminer quand faire le plein d'énergie.

Dans des pays où le mix énergétique contient une proportion élevée d'énergie renouvelable, comme le Danemark, l'Autriche ou la Suisse, les bilans écologiques des véhicules électriques sont bien meilleurs. En Autriche, par exemple, environ 150 grammes de dioxyde de carbone sont libérés par kilowattheure, soit seulement 28% de la valeur allemande d'après 2016, ce qui réduit les émissions calculées d'une BMW i3 de 66 à 19 grammes par kilomètre parcouru.



Une batterie chauffe quand on en tire du courant au-delà de 85 % de sa charge



Il est aussi important de tenir compte de la façon dont les batteries sont employées : les utiliser presque vides ou les charger à plein diminue leur durée de vie. Autre aspect : une batterie chauffe quand on en tire du courant au-delà de 85 % de sa capacité de charge. Le premier retour d'expérience acquis avec les modèles Tesla suggère cependant qu'il est possible de faire durer les batteries plus longtemps qu'on ne le craignait.

Les voitures électriques ont aussi beaucoup d'avantages en usage urbain. En cas de

démarrages et de freinages fréquents, elles récupèrent une grande part de l'énergie cinétique, contrairement aux moteurs thermiques, particulièrement inefficaces sur ce point. Leur inconvénient est cependant de devoir propulser un poids plus important.

En Allemagne, tout indique que les voitures électriques deviendront de plus en plus propres, non pas en raison des progrès techniques à venir, mais plutôt grâce à l'amélioration prévisible du mix énergétique. Même un véhicule électrique acheté en 2017 contribuera probablement à la baisse des émissions calculées en 2025. Selon le Ministère fédéral de l'environnement, le bilan écologique au kilomètre d'une voiture électrique pourrait s'améliorer d'environ un tiers au cours de 12 ans de durée de vie. En 2029, le facteur d'émission de l'électricité devrait tomber à environ 350 grammes d'émissions de CO₂ par kilowattheure. Un ordre de grandeur considéré comme réaliste selon plusieurs scénarios. Ainsi, l'Öko-Institut et l'Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation (ISI) ont compilé huit de ces prévisions et trouvé des facteurs d'émission variant de 233 à 376 grammes de CO₂ par kilowattheure produit.

LA GIGAFACTORY DE TESLA RÉDUIRA-T-ELLE L'IMPACT DE LA FABRICATION DES BATTERIES ?

La production de batteries augmentera aussi beaucoup dans les années à venir. Dès que le fondateur de Tesla, Elon Musk, aura achevé au Nevada sa Gigafactory pour batteries, conçue pour une production moins émettrice de gaz à effet de serre, les experts s'attendent à une réduction de moitié des émissions associées à la fabrication des batteries. Bien entendu, produire dans des pays comme la Norvège ou l'Islande, où beaucoup d'électricité propre est disponible grâce à l'hydroélectricité et à la géothermie serait encore mieux. En revanche, des usines allemandes de batteries n'auraient qu'un léger avantage sur des usines chinoises.

Tout cela ne joue aucun rôle dans le bilan écologique d'une voiture électrique immatriculée aujourd'hui, puisque sa batterie est déjà produite. Pour autant, de nombreux constructeurs ne vendent pas les batteries, mais les louent, afin d'apaiser les inquiétudes des acheteurs de voitures au sujet de cette nouvelle technologie. Dès lors, si ce composant essentiel d'un véhicule électrique devait être remplacé, il faudra ajouter une nouvelle empreinte écologique à l'analyse du cycle de vie, mais sur la base de conditions de production améliorées.

La batterie remplacée ne serait donc pas qu'une perte sur le plan écologique, mais pourrait amener un gain. Par ailleurs, de nombreux



Dans un projet pilote visant à donner une seconde vie aux batteries de voitures électriques, le constructeur automobile Daimler a constitué, à partir de celles des Smart électriques, un stockage d'électricité de 13 kilowattheures, qu'il a relié au réseau électrique.

experts pensent aujourd'hui qu'il est aussi possible de donner une seconde vie aux batteries de voiture. Si une batterie a des performances dégradées, cela ne tient peut-être qu'à quelques dizaines d'éléments parmi les milliers dont elle est composée. Des réparateurs pourraient les remplacer puis vendre des batteries «révisées». Ou bien on pourrait réutiliser les batteries usagées pour stocker l'électricité produite sur les panneaux photovoltaïques des toits pendant la journée, afin de s'en servir le soir.

IL N'Y A PAS QUE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Jusqu'à présent, nous n'avons parlé que des émissions de gaz à effet de serre. La prise en compte d'autres polluants ou dégradations environnementales conduirait à des chiffres très différents. À cet égard, le cas des pneumatiques est typique: l'abrasion des pneus est en effet une source importante de particules fines, et c'est parfois un problème sur les carrefours fréquentés. Or le conducteur d'un véhicule électrique peut, dès le démarrage, exploiter tout le couple moteur. Il en résulte d'importantes forces au niveau du contact pneu-chaussée, et donc le dégagement de davantage de poussières fines. Les quinze experts de Klaus Beckmann proposent pour cette raison de régler les moteurs électriques de façon à éviter les accélérations trop violentes.

Autre point à considérer: les véhicules électriques ne fonctionnent pas tous avec une batterie. Dans les voitures à pile à combustible, de l'hydrogène est transformé en électricité pour entraîner un moteur électrique. À l'avenir, cet hydrogène, aujourd'hui obtenu surtout à partir de gaz naturel, pourrait être produit à partir de l'énergie éolienne excédentaire. Or le ravitaillement d'une voiture à pile à combustible est

rapide, ce qui est un gros avantage. Toutefois, pour que des voitures ainsi équipées deviennent utilisables au quotidien, il faudrait créer tout un réseau de stations-service à l'hydrogène, un gaz hautement explosif, et les investissements nécessaires seraient énormes.

Une autre possibilité serait de transformer l'hydrogène en méthane par hydrogénation du CO₂, puis de stocker ce méthane de synthèse dans le réseau de gaz. Les voitures à gaz naturel pourraient fonctionner à partir de ce gaz produit pour ainsi dire à l'électricité. Une telle expérience est en cours chez Audi. Dans des projets similaires, on tente de produire des combustibles artificiels liquides à partir de l'électricité. En novembre 2017, le président du Club de Rome, Ernst Ulrich von Weizsäcker, évoquant ces deux possibilités, a mis en garde contre l'adoption prématurée des moteurs électriques fonctionnant sur batterie.

Ainsi, les voitures électriques ne sont pas automatiquement la panacée climatique que présentent les industriels et les politiques. Elles pourront cependant contribuer de façon significative à rendre le transport routier plus respectueux de l'environnement. Certains pensent même que l'électromobilité représente la seule stratégie réaliste. Pour que cela soit le cas, il faut dès aujourd'hui tracer la bonne voie: la production et l'utilisation des véhicules alimentés par batterie doivent devenir plus efficaces; l'électricité nécessaire doit provenir de davantage de sources d'énergie renouvelables; et les voitures de luxe équipées de moteurs et de batteries surpuissantes doivent être réglementées. Les automobilistes habitués à pouvoir à tout moment se déplacer confortablement en voiture devront aussi faire évoluer leurs attentes et limiter le kilométrage parcouru. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Hall et Nic Lutsey (dir.), **Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions**, International Council on Clean transportation (ICCT), février 2018.

E. Helmers et M. Weiss, **Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars**, *Energy and Emission Control Technologies*, vol. 5, pp. 1-18, 2017.

M. Chéron et al., **Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ?**, Fondation pour la nature et l'homme, décembre 2017 (rapport téléchargeable sur <https://bit.ly/2EeQUN4>).

J. F. Peters et al., **The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters – A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 491-506, 2017.

POUR LA  Édition française de Scientific American

SCIENCE

numéro collector

NOVEMBRE 2018
N° 1



Les paradoxes du TEMPS

Le temps
est-il
une illusion ?

Le temps
a-t-il
une fin ?

Le temps
est-il
un luxe ?

Le temps
est-il le même
pour tous ?

BEL : 00 € - CAN : 00 CAD - DOM/5 : 00 € - Réunion/A : 00 € - ESP : 00 € - GR : 00 € - ITA : 00 € - LUX : 00 € - MAR : 64 MAD - TOM : 0000 XPF - PORT. CONT. : 00 € - CH : 00 CHF - TUN/5 : 00 TND

Chez votre marchand de journaux
le 7 novembre

L'eau, le géologue et la Grande Guerre

Comment abreuver un million de chevaux à raison de 15 à 60 litres par jour et par animal ? Comment protéger de la boue les myriades d'hommes terrés dans les tranchées ? Tels étaient les défis des géologues, acteurs méconnus de la guerre de 14-18.

Août 1914. La progression des troupes allemandes en Belgique est fulgurante. L'armée a pénétré les Flandres du nord, des plaines basses lardées de canaux et de cours d'eau qu'une simple bande de dunes sépare de la mer du Nord. L'armée belge résiste difficilement. Le 21 octobre, en ultime recours, alors que les Allemands s'approchent de Nieuport, les Belges décident d'inonder artificiellement la plaine. Ils ouvrent les portes de l'écluse de la vieille Yser, par lesquelles l'eau de mer se déverse sur 4 kilomètres carrés dans la dépression du fleuve. Puis, dans la nuit du 29 au 30 octobre, des soldats belges rejoignent à bicyclette des écluses situées sur la ligne allemande et les ouvrent. Bientôt, non seulement 50 kilomètres carrés de terrains inondés barrent la route aux Allemands, mais les tranchées qu'ils avaient creusées alentour sont noyées et inexploitable.

Le revers de Nieuport a marqué les ingénieurs militaires allemands. Très vite, ils ont compris l'importance des connaissances hydrogéologiques dans la conduite de cette guerre. De fait, la géologie a contraint chaque instant de la Première Guerre mondiale. Comme par le passé, dès le début du conflit, la topographie a

guidé la guerre de mouvement. Il fallait prendre les points hauts pour s'y retrancher et ancrer son artillerie en surplombant de préférence les rivières, véritables barrières naturelles. Mais le rôle clé de la géologie, et notamment de l'hydrogéologie, est vraiment apparu lorsque, à l'automne 1914, le front s'est stabilisé du fait de la puissance inédite de l'artillerie. Le conflit est alors devenu une guerre de position, qui ne faisait pas partie de la stratégie. Il imposa des contraintes nouvelles comme l'approvisionnement en eau et en matériaux, la construction d'abris et de tranchées, l'exploration du sous-sol. C'est ainsi que, pour la première fois, des géologues ont été employés pour leur métier durant un conflit. En examinant cette guerre avec des yeux de géologue, on mesure à quel point le rôle de cette discipline y a été essentiel, en particulier pour la gestion de l'eau.

DE L'EAU POTABLE POUR LES SOLDATS

Avec la stabilisation du front fin 1914, les puits existants ne suffirent plus à approvisionner les soldats et leurs chevaux en eau potable, et les eaux de surface sont polluées. Or, en moyenne, un cheval consomme entre 15 et 60 litres d'eau par jour, et les Français ont mobilisé un million de chevaux. Pour son corps expéditionnaire

© Cgll La contemporaine / Ref. carte VAL 416/108



L'ESSENTIEL

> La Première Guerre mondiale fut le premier conflit où l'on employa des géologues pour leur métier.

> Lorsque la ligne de front s'est figée, fin 1914, l'eau et l'espace souterrain sont devenus particulièrement convoités.

> En étudiant les spécificités du sol tout le long de cette ligne,

des géologues britanniques, allemands, français et australiens ont aidé les armées à s'approvisionner en eau et à éviter les nappes phréatiques lors du creusement des tranchées et des galeries souterraines.

LES AUTEURS



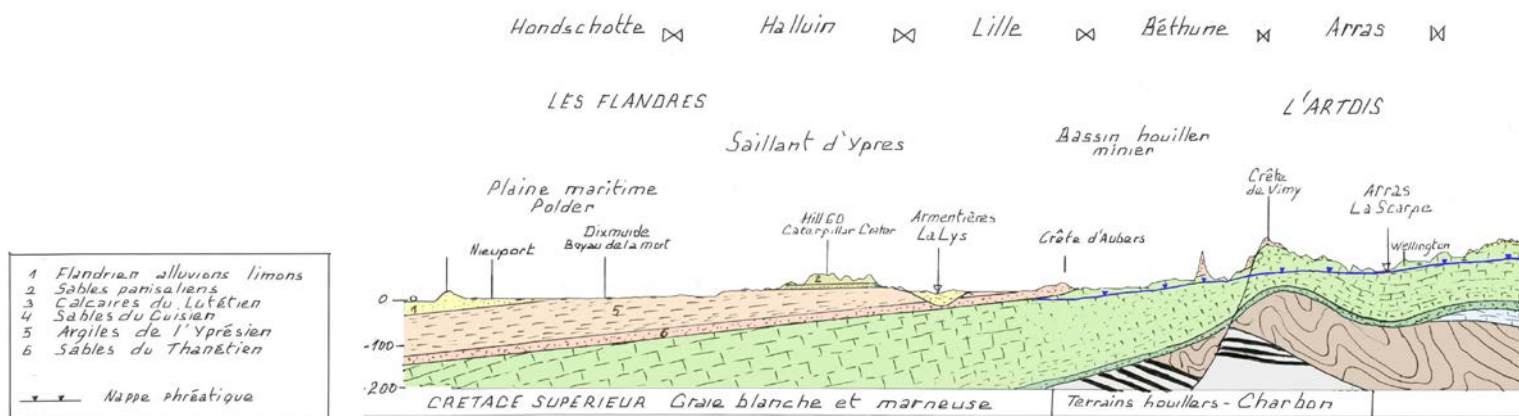
FRANCK HANOT
géologue, créateur
de la société CDP
Consulting, à Blois



FREDÉRIC SIMIEN
géochimiste,
responsable des
éditions du BRGM,
à Orléans



Un soldat remplit sa gourde grâce à un réservoir d'eau stérilisée le 4 janvier 1917 à Lamotte-en-Santerre, dans la Somme, au milieu d'une boue collante.



8 (1,5 million d'hommes et 500 000 chevaux et mules en 1916), l'armée britannique estime à 76 000 mètres cubes les besoins quotidiens en eau potable, soit environ 25 piscines olympiques. À cela s'ajoute l'eau pour les boulangeries et les boucheries de campagne, le lavage, les locomotives, la fabrication du béton pour construire les abris... L'enjeu est considérable. Il est donc nécessaire de procéder à des forages et de protéger leur aire de captage des pollutions.

L'armée française est en terrain connu. Grâce aux connaissances géologiques de son service de l'eau potable, elle a déjà foré des milliers de puits dans la région sans l'aide des hydrogéologues académiques et n'éprouve pas immédiatement le besoin de faire appel à eux, même si, peu à peu, des géologues civils, tel le pétrologue et géologue de terrain Charles Barrois, directeur des laboratoires de Lille, sont mis à disposition comme conseillers. En revanche, pour les armées britannique et allemande, la situation est tout autre. La géologie du terrain leur est complètement inconnue. De plus, ils n'ont pas de service géologique dédié aux applications militaires.

En juin 1915, face aux difficultés d'approvisionnement en eau dans le nord de la France, le War Office dépêche un géologue du Service géologique britannique. Bill King est affecté au commandant en chef du génie. Son premier travail consiste à compiler les données géologiques pour déterminer les secteurs favorables à l'implantation de puits. Sous son impulsion, l'armée britannique se dote aussi d'un matériel dérivé des techniques de forage pétrolier pour atteindre l'eau en profondeur, moins susceptible d'être polluée. Il supervise ainsi les emplacements d'au moins 470 forages d'eau, dont certains sont toujours utilisés. Sur cette base, son équipe établit une carte hydrogéologique de la Somme.

En mai 1916, le major australien Edgeworth David vient renforcer l'équipe. Les Allemands sont en train de prendre l'avantage dans la guerre sous terre et il doit aider à reprendre le dessus. Son apport majeur est de déterminer,

dans les Flandres, la profondeur et l'extension du niveau d'argile bleue du Thanétien, un étage géologique vieux de 56 à 59 millions d'années. Cette couche est en effet la plus adaptée au creusement de tunnels pour placer des mines sous les lignes ennemies – un élément décisif dans la préparation de l'attaque de la crête Messines-Wytschaete, programmée à l'été 1916.

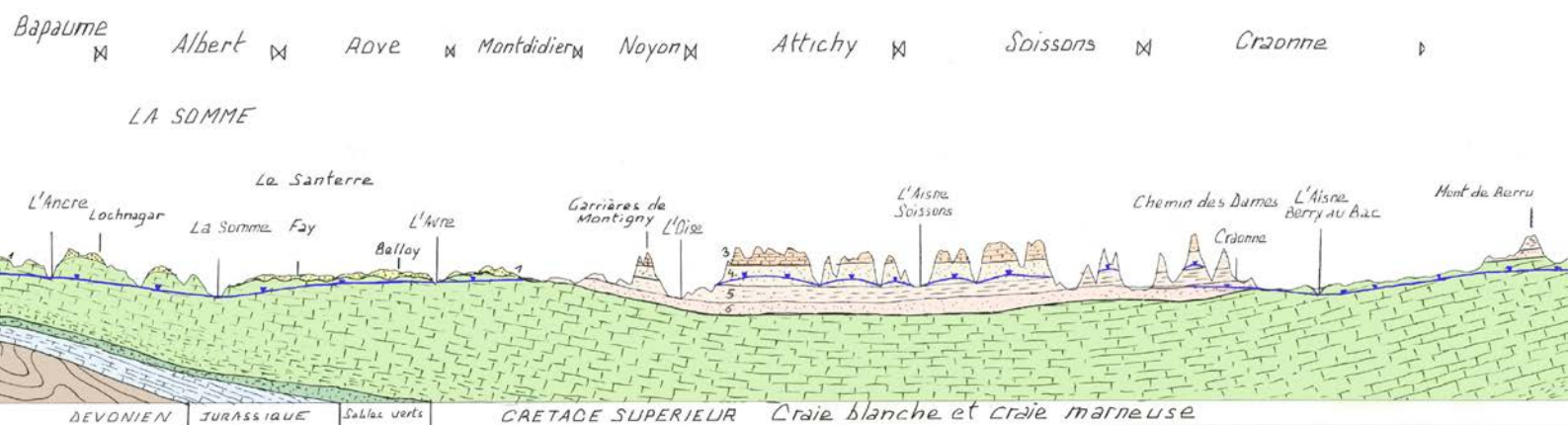
De leur côté, les Allemands ont vite les mêmes préoccupations. Début 1915, les géologues des unités combattantes sont réaffectés dans une unité semi-militaire sous le commandement de Hans Philipp, professeur de géologie à l'université de Greifswald. Ils réalisent des cartes d'approvisionnement en eau à l'échelle 1/50 000 avec des indications sur la qualité et la quantité. L'un des plus grands systèmes mis en place par les Allemands semble être un réseau d'alimentation en eau du côté de la crête Messines-Wytschaete. L'eau pour approvisionner les soldats provient de quatre puits de profondeurs comprises entre 156 et 256 mètres situés dans les environs d'Halluin, à une quinzaine de kilomètres à l'est. Les 6 000 mètres cubes pompés quotidiennement alimentent 2 000 robinets sur une superficie de 155 kilomètres carrés. Par la force des choses, la géologie militaire allemande gagne peu à peu la meilleure expertise du terrain : elle a sous sa responsabilité 3 000 kilomètres de ligne de front, contre 600 kilomètres pour les Français et 150 pour les Britanniques. C'est en effet elle qui fournit les informations topographiques et géologiques à ses alliés austro-hongrois, bulgares et turcs.

COUPE GÉOLOGIQUE LE LONG DE LA LIGNE DE FRONT

Du rivage belge à la frontière avec la Suisse, la ligne du front occidental vers l'automne 1914 recoupe des entités géologiques et hydrogéologiques très différentes. Ces terrains appartiennent pour la plupart au bassin de Paris, vaste cuvette encadrée au nord par la plaine des Flandres et à l'est par le massif des Vosges. La craie du Crétacé supérieur, épaisse d'environ 500 mètres (en vert) affleure dans l'Artois, dans la Somme et en Champagne. Cette roche assez homogène contient une importante nappe phréatique. Elle est couverte localement, comme au Chemin des Dames, par des couches d'âge tertiaire peu épaisses contenant de petites nappes phréatiques à l'origine de nombreuses sources.

LE CAUCHEMAR DU MARMITAGE

Gérer l'eau ne consiste pas seulement à assurer son approvisionnement. L'eau peut aussi représenter un obstacle et, là encore, la connaissance du terrain est indispensable pour la contrer. Pour la première fois, une guerre s'accompagne d'un bombardement dense et continu d'obus. Ce « marmitage » de l'artillerie transforme le sol en une boue collante où



pataugent les fantassins pendant des semaines. Celle-ci envahit les tranchées et devient un piège mortel pour les hommes qui ne parviennent pas à s'en extraire. D'autant que la période du conflit est très humide: 648 jours de pluie ou de neige sur les 1563 jours de guerre. Or deux types de terrains sont particulièrement redoutés dans ce cas, car l'eau y est plus susceptible de recouvrir les cratères d'obus: les terrains argileux, peu perméables à l'eau, et ceux où des eaux souterraines sont présentes à faible profondeur. En Picardie, par exemple, l'eau est contenue dans des sables, sous pression sous une mince couche d'argile. Un obus suffit à traverser cette couche et à mettre à nu les nappes phréatiques.

infiltration. Ce phénomène détermine en profondeur un contact entre une tranche supérieure sèche où les vides contiennent de l'air, car l'eau ne fait que transiter, et une tranche inférieure saturée, où les vides contiennent de l'eau. Ce phénomène est dynamique, car les sources alimentant les cours d'eau vidangent ces mêmes aquifères. Des couches d'argile plus ou moins épaisses compliquent le mécanisme en créant des zones où l'eau est totalement absente. Les stratégies adoptées dépendent de tous ces paramètres et varient selon les régions.

GUERRE DES TAUPES DANS LES FLANDRES

L'eau de la plaine des Flandres fait de cette zone un enfer pendant tout le conflit. Les terrains de cette plate région sont constitués d'argile et de sables de l'Yprésien (vers 50 millions d'années), définis d'après la ville d'Ypres, en Belgique. Le réseau de drainage détruit en octobre 1914 laisse rapidement place à une constellation de trous d'obus remplis d'eau. Le soldat ne peut évoluer que dans les tranchées spécialement équipées de caillebotis. Un arc de collines composé des Monts des Flandres domine la région d'Ypres par l'est et le sud. Ces reliefs sont le siège de la guerre des mines dans des lieux tels que Hooge, Zillebeke, Hill 60, Caterpillar Crater, Saint-Éloi, the Bluff, Wytschaete...

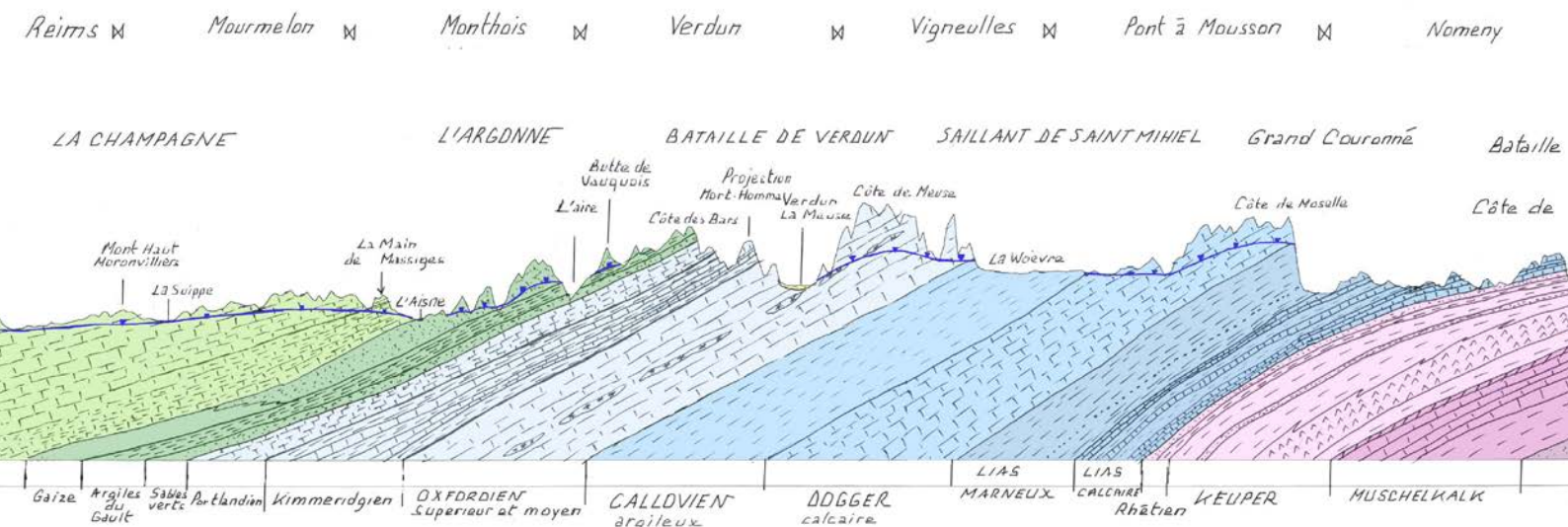
L'objectif est de détruire l'ennemi en positionnant sous ses lignes, à quelques dizaines de mètres de profondeur, des charges d'explosif pouvant atteindre 40 tonnes. Placer ces charges nécessite le creusement de galeries inclinées partant de la surface et recoupant des couches de sables et d'argiles. Si creuser dans les argiles ne présente aucun danger, atteindre une couche de sable gorgée d'eau risque de noyer la galerie, ne laissant aucune chance aux tunneliers. Les géologues militaires du Commonwealth, en particulier les Anglais et les Australiens, sont mobilisés pour mener des études préliminaires afin de limiter les risques.



L'armée britannique estime à 76000 m³ les besoins quotidiens en eau potable



La présence d'eau en profondeur doit aussi être connue avec précision afin de l'éviter lorsque l'on creuse des galeries souterraines pour progresser ou séjourner à l'abri de l'ennemi. Or la répartition de l'eau en surface et en profondeur dépend de la nature des roches. Un calcaire ou un grès poreux et fracturé font un excellent réservoir aquifère pouvant contenir jusqu'à 40% d'eau, tandis que l'argile ne contient pas d'eau et joue un rôle d'écran. La pluie alimente les couches aquifères par



Plus au sud, séparant la plaine des Flandres des plaines crayeuses du nord du bassin de Paris, le relief des collines de l'Artois est jalonné de hauts lieux tels que Notre-Dame-de-Lorette et la crête de Vimy. Au cours des combats de 1915, les Français perdent environ 40000 hommes dans le borbier du flanc nord de Notre-Dame-de-Lorette – un lieu décrit comme un paysage de cauchemar où boue et restes humains sont mêlés. Il est vrai qu'une faille coupe la butte, préservant au nord les argiles du Tertiaire. En 1916, les alliés mettent à profit l'absence d'eau dans le relief de la crête de Vimy pour y creuser des galeries afin d'y placer des mines et désorganiser l'ennemi. Le jour de Pâques 1917, ils percent les lignes et avancent sur plusieurs kilomètres. Les Canadiens, qui y ont gagné en émancipation vis-à-vis de la tutelle britannique, considèrent cette victoire comme l'acte fondateur de leur nation.

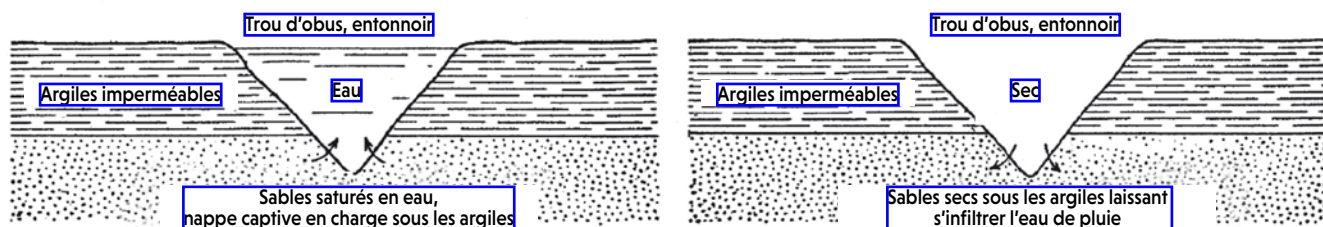
C'est la même absence d'eau sur une épaisseur d'environ 30 mètres dans la craie dite dénoyée qui, plus au sud, sous la ville d'Arras (faubourgs Ronville et Saint-Sauveur), permet l'aménagement par des tunneliers néo-zélandais de cantonnements souterrains capables d'accueillir 25000 soldats britanniques. Néanmoins, malgré l'effet de surprise avec des soldats jaillissant de terre, la bataille d'Arras, du 9 avril au 7 mai 1917, se solde par d'importantes pertes et un gain limité sur le terrain.

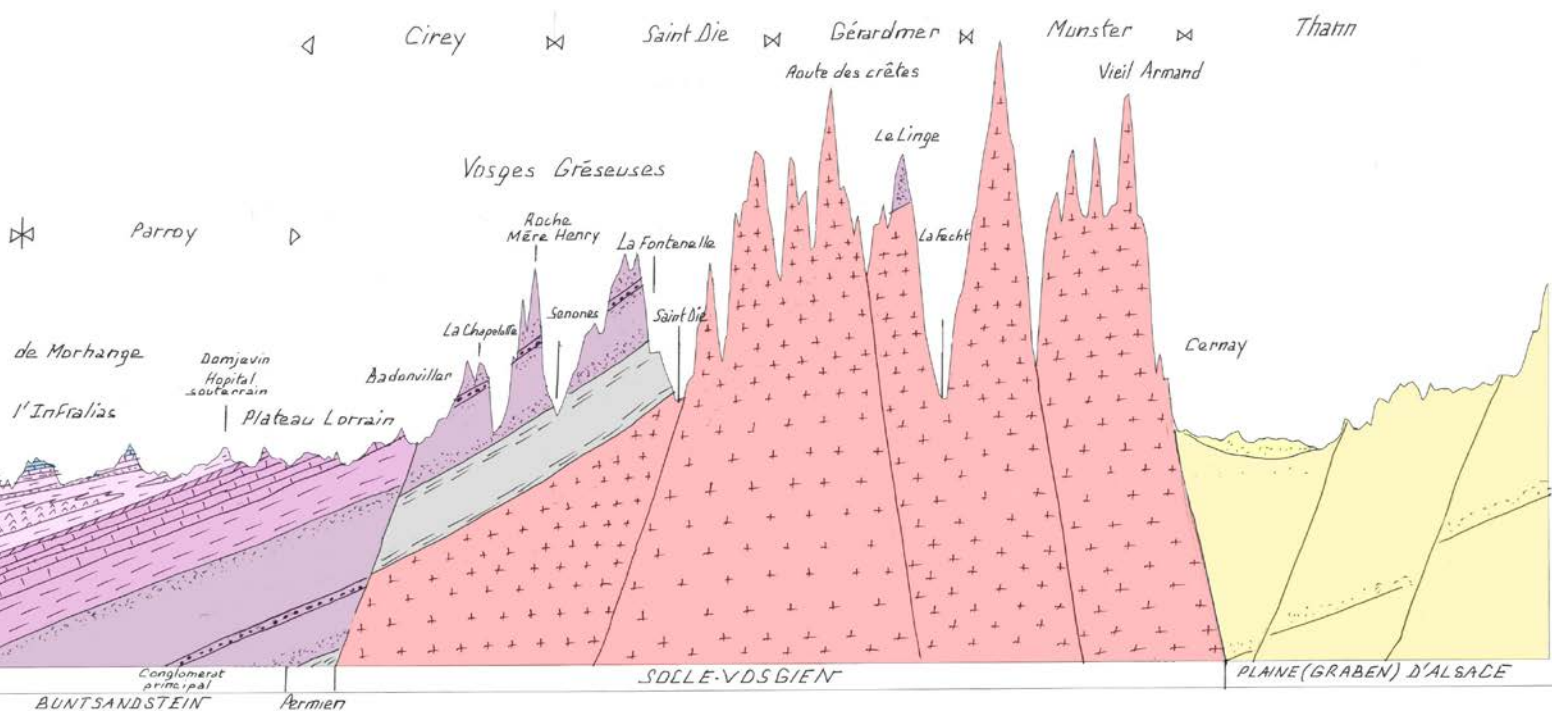
Pour préparer la bataille de la Somme, de nombreux ouvrages souterrains sont aussi creusés au nord de la rivière éponyme, dans une craie parfaitement sèche sur plusieurs dizaines de mètres. Elle démarre le 1^{er} juillet 1916 avec dix-neuf explosions simultanées considérables. Au sud de La Boisselle, les mineurs gallois ont placé 27 tonnes d'explosif (ammonal) à 16 mètres de profondeur sous les lignes allemandes, dont l'explosion laisse un cratère toujours visible de 90 mètres de diamètre pour 30 de profondeur.

La Champagne pouilleuse où le front se stabilise pendant quatre ans est le pays de la soif, un désert blanc où la poussière de craie dessèche la bouche. Les rares points d'eau nécessitent des corvées sur des distances de plusieurs kilomètres. L'eau est essentiellement souterraine et, contrairement aux armées allemandes et britanniques, équipées de foreuses et de pompes, rien n'a été prévu pour les poilus français. L'intensité des combats raze des villages de la carte. Les dégâts sont tels que de grands espaces seront conservés en l'état et convertis en terrains d'essais (Moronvilliers) ou d'entraînement militaire (Suippes).

En Argonne, région couverte de forêts au relief marqué, la butte de Vauquois est un site emblématique. C'est la zone d'affleurement de la gaize, une roche particulière de couleur verdâtre, à la fois poreuse et légère, mais relativement résistante. La butte de Vauquois constitue

Selon le terrain, un trou d'obus est vite inondé en cas de pluie ou reste sec, le sol drainant les eaux de pluie.





une butte témoin culminant à 285 mètres. L'érosion l'a modelée et séparée de la couche initiale, lui faisant dominer les environs d'une hauteur de 120 mètres. À partir du 21 février 1916, Vauquois voit son rôle de poste d'observation renforcé. La géologie particulière de cette butte témoin dénoyée (sans nappe phréatique) et cette roche si propice au creusement de galeries (17 kilomètres sont percés) permettent une guerre souterraine folle, au cours de laquelle sont recensées 519 explosions. En quatre ans de conflit, près de 15 000 hommes trouvent la mort sur cette petite parcelle de Lorraine (8000 Français, 6300 Allemands et 100 Américains).

UN HÔPITAL DANS LES MARNES DE LA LORRAINE

En Lorraine, à l'est de Nancy, la ligne de front d'octobre 1914 fluctue également très peu pendant quatre ans. La topographie de cette zone se caractérise par de molles ondulations de quelques dizaines de mètres. Les terrains constituant le soubassement correspondent aux marnes du Keuper inférieur, un étage géologique vieux de 230 à 220 millions d'années. Creuser des galeries dans ces marnes ne présente *a priori* pas de difficulté, car les couches aquifères sont pratiquement inexistantes et, par conséquent, il est rare que les eaux envahissent les conduits. Les sapeurs allemands profitent de leur connaissance du terrain pour creuser des mines vers le sud sous les lignes françaises depuis Leintrey. L'explosion du 11 juillet 1916 pulvérise une grande partie d'une compagnie du 162^e régiment d'infanterie et laisse place à des entonnoirs d'une cinquantaine de mètres de diamètre et de vingt mètres de profondeur. Plus au sud, à Domjevin (côté français), un hôpital destiné à soigner les blessés intransportables est mis en

chantier à partir de juillet 1916 dans une butte constituée des mêmes marnes. Il ne sera jamais mis en service, car il est planifié pour une offensive prévue le... 14 novembre 1918.

La guerre dans le Massif des Vosges présente de nombreux défis techniques. Les combats souterrains sont menés là où le relief, la géologie et l'hydrogéologie le permettent. L'eau ne doit pas être un obstacle dans le creusement d'ouvrages souterrains atteignant parfois 80 mètres de profondeur dans les grès relativement tendres du Trias inférieur (vers 250 millions d'années), comme à La Chapelle. Elle est vitale sur les crêtes pour alimenter les troupes, mais aussi pour fabriquer le béton des abris là où le creusement dans la roche trop dure est impossible.

Les connaissances des géologues ont ainsi joué un rôle fondamental dans le déroulement de la Grande Guerre. Et si elles ont été précieuses pour l'approvisionnement en eau et le creusement des galeries, elles ont aussi été fort utiles pour de nombreux autres aspects méconnus et insolites, comme l'établissement de cartes de praticabilité pour les tanks ou l'expertise des matériaux des compas d'aviation et des cristaux de quartz, qui ont servi à développer les premiers sonars, destinés à détecter les sous-marins, ou encore pour répondre à la grande demande de minerais et de pétrole. Aujourd'hui, alors que l'on commémore le centenaire de la fin des combats, des géologues continuent d'apporter leur expertise aux conflits modernes. Mais d'autres scrutent toujours les champs de bataille de la Première Guerre mondiale. Ils y étudient à présent son impact en termes de pollution chimique ou recherchent des cavités dangereuses à sécuriser. Les géologues n'en ont pas fini avec la Grande Guerre. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Hubé, 14-18, **Tremblements de guerre**, BRGM éditions, 2018.

F. Hanot et F. Simien, **Sous les lignes de front**, BRGM éditions, 2017.

E. P. F. Rose et J. D. Mather, **Military aspects on hydrogeology**, GSL Special Publications, 2012.

A. H. Brooks, **The use of geology on the western front**, USGS, 1920. <https://on.doi.gov/2NKBvso>

R

ENDEZ-VOUS

P.78 Logique & calcul
P.84 Idées de physique
P.88 Science & fiction
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

UN GRAPHE UNIVERSEL ET SINGULIER

Qu'un seul nombre puisse contenir, dans ses décimales, tous les autres est déjà un fait étrange et troublant. Mais le monde des graphes présente une situation analogue encore plus surprenante, qui frôle le paradoxe.

L'AUTEUR



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

Les nombres universels contiennent toutes les images numériques, tous les textes possibles, et tous les nombres finis ou infinis, y compris eux-mêmes une infinité de fois. De même, le « graphe universel de Rado » contient tous les graphes finis ou infinis. Il existe cependant une différence importante entre ces deux universels : il y a une infinité de nombres universels, alors que le graphe universel de Rado est unique. Il est l'un de ces objets mathématiques aux propriétés déconcertantes dont les chercheurs découvrent l'existence avec stupeur et émerveillement. Aventurons-nous dans ce monde étrange de l'universalité mathématique.

LES NOMBRES UNIVERSELS

En choisissant successivement des chiffres au hasard $a_1, a_2, a_3, \dots$, par exemple avec un dé à dix faces et en les prenant comme les décimales successives d'un nombre commençant par 0, on définit un nombre réel u compris entre 0 et 1 : $u = 0, a_1 a_2 a_3 \dots$. Nous considérons ici l'écriture des nombres en base 10, mais ce que nous allons affirmer s'étend à toute base de numération.

Si votre dé est équilibré, c'est-à-dire si chaque face tombe avec une probabilité de $1/10$, le nombre u est un nombre universel, ou « nombre univers », ou « nombre disjonctif ». Par définition, cela signifie que toute suite finie de chiffres se situe quelque part après la virgule, en un seul bloc, dans les décimales de u .

Dans u , vous trouverez donc par exemple 20 fois de suite le 7, ou 1000 fois de suite le 0,

ou la séquence 19982018. Cela signifie aussi que si vous codez la photo de votre grand-père par une suite de chiffres, par exemple avec un million de chiffres lus comme des niveaux de gris et qui, disposés en un carré de 1000 pixels sur 1000, reproduisent la photo, alors cette photo de votre grand-père est quelque part dans ce nombre universel. Bien sûr, dans u , il y a aussi la photo de votre chat, celle de Georg Cantor, celle de la tour Eiffel en construction en janvier 1888, celle de Neil Armstrong posant le pied sur la Lune le 20 juillet 1969, etc. En utilisant un codage où deux chiffres consécutifs définissent un numéro de lettre, vous trouverez aussi dans le nombre universel u le texte des *Éléments* d'Euclide, la déclaration universelle des droits de l'homme en serbo-croate, *Le Capital* de Karl Marx écrit en français à l'envers et en supprimant la page 666, et même le texte de cet article ou le récit en dix pages de votre journée de demain. Je n'insiste pas, à vous d'imaginer.

La méthode du dé à dix faces pour définir un nombre universel n'est pas parfaitement satisfaisante, car elle fait intervenir le hasard et qu'il faut attendre un temps infini pour en disposer ! Une autre méthode, cette fois déterministe, proposée par David Champernowne, un ami d'Alan Turing, consiste à écrire les uns derrière les autres les chiffres des entiers : le nombre de Champernowne $Ch = 0,1234567891011121314151617181920212223\dots$ est universel. Concaténer les nombres premiers donne aussi un nombre universel.

Par définition, les nombres universels contiennent toutes les suites finies possibles de >



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

TOUS LES GRAPHES SONT DANS LE GRAPHE DE RADO

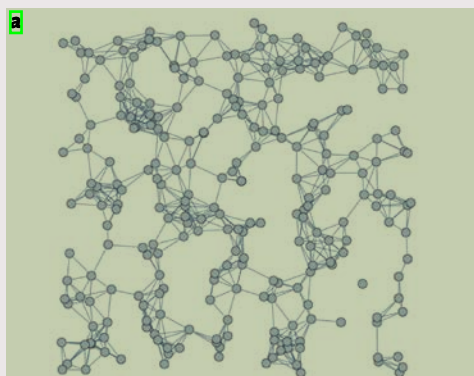
1

Partout en mathématiques, en informatique et dans bien d'autres domaines, on rencontre des graphes finis (c'est-à-dire qui ont un nombre fini de nœuds) ou infinis. Le graphe *a* est un graphe aléatoire, produit par un programme écrit en Mathematica (<https://mathematica.stackexchange.com/questions/38589/random-geometric-graph-generation-problem?rq=1>). Le graphe *b* est un arbre binaire infini : chaque branche se divise en deux branches

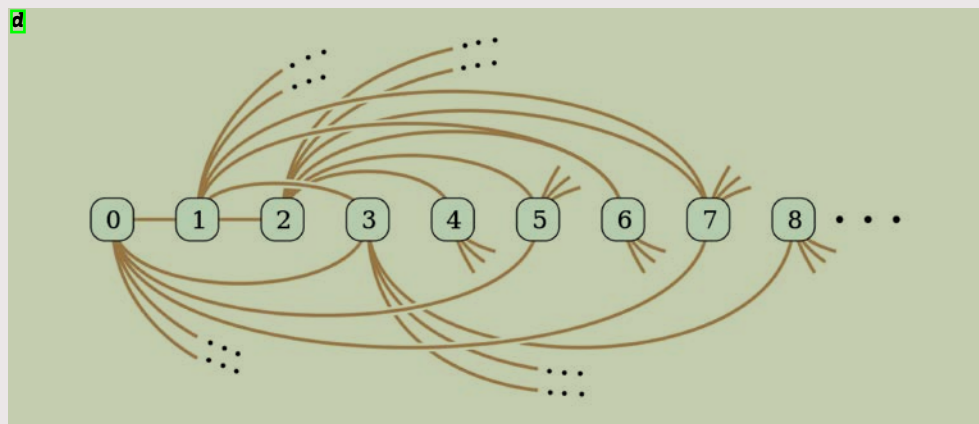
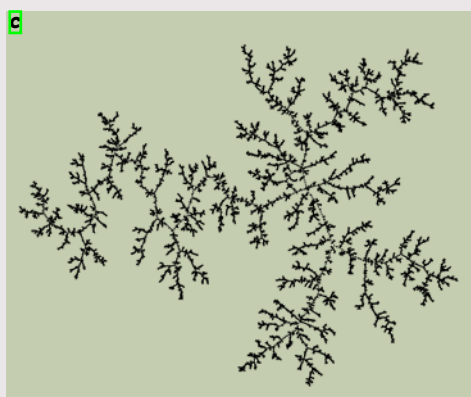
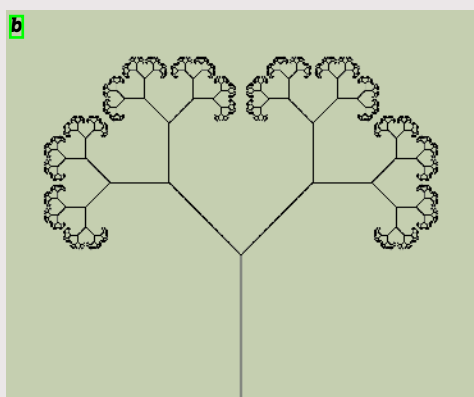
symétriques. Le graphe *c* est un graphe aléatoire dont on a fait tendre la longueur des arcs vers zéro. Ces graphes, ainsi d'ailleurs que tous les autres, sont présents dans le graphe de Rado (*d*), dont la structure contient toutes les structures de graphes (finis ou infinis) possibles. Les nœuds du graphe de Rado sont identifiés par les entiers naturels. Les arêtes sont déterminées par la règle suivante. Si x et y sont deux nombres entiers, avec $x < y$, il existe une arête les reliant

si le x -ième chiffre (en comptant à partir de la droite et en partant de 0) de y écrit en binaire est un 1.

Prenons l'exemple $x = 2$, $y = 5$. L'écriture binaire de y est 101, dont le 2^e chiffre à partir de la droite, en comptant à partir de 0, est 1. On a donc une arête entre les nœuds 2 et 5. En revanche, pour $x = 1$ et $y = 5$, il n'y a pas d'arête reliant ces deux nœuds, car le 1^{er} chiffre à partir de la droite (en comptant à partir de 0) de l'écriture binaire (101) de y est 0.



Richard Rado, né en 1906 à Berlin d'un père hongrois, est mort en Grande-Bretagne en 1989, où il avait émigré en 1933 après l'arrivée des nazis au pouvoir.



chiffres comme sous-suite de chiffres consécutifs. Ces nombres sont universels dans un autre sens: ils contiennent tous les nombres réels compris entre 0 et 1, quel que soit leur développement décimal infini. Le sens de «contient» n'exige pas, cette fois, que les chiffres pris en considération soient consécutifs: le nombre $r=0, a_1 a_2 a_3 \dots$ contient le nombre $s=0, b_1 b_2 b_3 \dots$ si dans r on trouve dans l'ordre les chiffres de s . Le nombre $r=0,1234321234321234321\dots$ contient par exemple le nombre $s=0,123123123123$; on a souligné ce qui permet de l'affirmer. L'inverse n'est pas vrai: s ne contient pas r .

Si r et r' sont deux nombres universels, alors r contient r' , et r' contient r . Cela semble un peu paradoxal, mais à tort: l'infini le permet. Cette propriété de double inclusion est amusante, bien que ce soit une conséquence facile de la première définition. En effet, si un nombre vérifie la première définition (toute suite finie y figure en un seul bloc), alors elle contient une infinité de fois le 0, une infinité de fois le 1, etc. Trouver dans l'ordre une suite infinie quelconque de chiffres est donc toujours possible.

De multiples calculs et tests font soupçonner, sans qu'on ait encore su le démontrer, que les nombres suivants, dont on ne considère que ce qui est derrière la virgule, sont universels: π , e , $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$, $\log 2$. C'est le cas aussi pour bien d'autres nombres rencontrés en analyse: ils

semblent universels sans qu'on sache l'établir rigoureusement. Tout ce qui concerne les nombres universels n'est heureusement pas aussi difficile à prouver. Voici quelques propriétés qui ont été démontrées.

Dans les chiffres d'un nombre universel, toute suite finie de chiffres est présente (en un seul bloc) non pas une fois, mais une infinité de fois; donc, quand un nombre est universel, si on modifie un nombre fini de chiffres soit en les supprimant soit en les remplaçant par d'autres, il reste universel.

Si l'on ne retient qu'un chiffre sur deux d'un nombre universel, il le reste. Il en est de même quand on prend régulièrement un chiffre sur k dans ses décimales. Pour le nombre de Champernowne, enlever un chiffre sur deux donne: $Ch' = 0,13579012345678901234567890123456789\dots$

On peut retirer d'un nombre universel tout autre nombre et obtenir que le reste soit encore un nombre universel. Idée de la démonstration: quand on cherche à retirer un chiffre, ne pas retirer le premier qui se présente, mais le suivant. Par exemple, si l'on cherche à retirer 0,123123123123... de 0,12345612345612346... prendre le second 1 (surligné), le second 2 qui se présente ensuite (surligné), le second 3 qui se présente ensuite, etc.

Il résulte de la propriété précédente que l'on peut retirer un nombre universel de lui-même... et recommencer une infinité de fois: un nombre universel est infiniment présent en lui-même. Les fractales ont des propriétés analogues, mais à la condition de changer d'échelle, ce qui n'est pas le cas ici.

Ce que l'on vient de voir pour les nombres universels est étrange. Ce que l'on va découvrir maintenant au sujet des graphes universels l'est encore plus, en particulier quant au lien qui existe entre les deux notions d'universalité.

GRAPHES FINIS ET INFINIS

Fixons le vocabulaire. Un graphe est un ensemble fini $\{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ ou infini «numérotable» $\{a_0, a_1, \dots, a_n, \dots\}$ de points, les «nœuds» du graphe, qui peuvent être liés par des «arêtes». Entre deux nœuds, soit il y a une arête (une seule), soit il n'y en a pas. Les arêtes ne sont pas orientées ($ab=ba$), et on ne s'autorise pas à relier un nœud directement à lui-même.

Un exemple de graphe infini est celui dont les nœuds sont étiquetés par les entiers positifs ou négatifs, avec une arête reliant chaque couple de nombres consécutifs $n, n+1$ (voir l'encadré 2). Autre exemple: le graphe complet reliant tous les entiers, où chaque entier est lié par des arêtes à tous les autres.

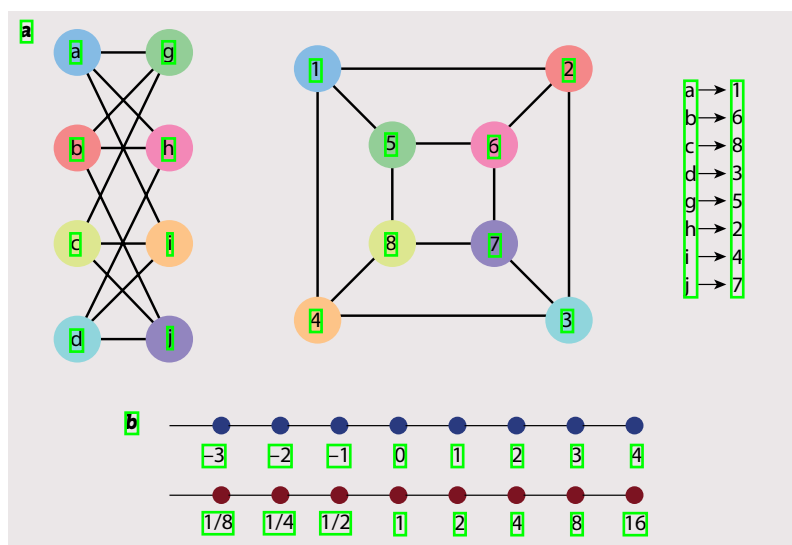
Deux graphes G et H sont «isomorphes» s'il est possible de remplacer les noms des nœuds de G par ceux des nœuds de H de telle façon que les arêtes du graphe G' ainsi obtenu coïncident

2

ISOMORPHISME DE GRAPHES

Deux graphes qui ont la même structure sont dits isomorphes: en renommant les nœuds d'un des deux graphes on obtient exactement l'autre graphe. Ainsi, les deux graphes finis représentés en (a) sont

isomorphes par la transformation indiquée à droite. Le schéma (b) donne un exemple de graphes infinis isomorphes par la transformation $n \rightarrow 2^n$.



exactement avec celles de H. Autrement dit, deux graphes sont isomorphes s'ils ont exactement la même structure.

Par exemple, considérons le graphe infini H dont les nœuds sont étiquetés par les nombres de la forme 2^n , où n est un entier positif ou négatif, et où une arête relie chaque couple de nombres $(2^n, 2^{n+1})$. Il est facile de voir que les deux graphes G et H, où G est l'exemple donné plus haut, sont isomorphes: en renommant 2^n chaque nœud n de G, on passe de G à H.

Un graphe G est considéré comme un sous-graphe du graphe H si chaque nœud de G est aussi un nœud de H et si les arêtes de G et de H reliant ces nœuds communs sont les mêmes. Dit plus simplement: on ne regarde dans H que les nœuds de G et leurs liens, et cela donne G. Lorsqu'un graphe H est isomorphe à un sous-graphe du graphe G, on dit simplement que H est inclus dans G ou que G contient H (voir l'encadré 3).

Les graphes finis inclus dans le graphe complet dont les nœuds sont les entiers (chaque entier étant lié à tous les autres) sont les graphes complets sur les ensembles finis. Bien que très dense, le graphe complet des entiers ne contient donc pas tous les graphes finis possibles (puisque les sous-graphes du graphe complet sont toujours des graphes complets, le graphe complet ne contient pas certains graphes finis).

Ces notions de graphes sont utiles dans une multitude de domaines: pour représenter des chemins, des dessins, des réseaux ou même des relations abstraites – par exemple commerciales, d'autorité ou de parenté.

LE GRAPHE DE RADO

Le graphe de Rado, aussi dénommé «le graphe aléatoire», ou «le graphe universel» a été découvert en 1964 par le mathématicien allemand Richard Rado; il avait été entrevu par l'Allemand Wilhelm Ackermann en 1937, puis par les Hongrois Paul Erdős et Alfréd Rényi en 1963.

La définition proposée par Rado est un peu rébarbative. Les nœuds du graphe de Rado sont les nombres entiers (voir le dessin dans l'encadré 1), il s'agit donc d'un graphe infini. Si x et y sont deux entiers, avec $x < y$, il y a une arête entre x et y si le x -ième chiffre (en comptant à partir de la droite et en partant de 0) de y écrit en base 2 est un 1.

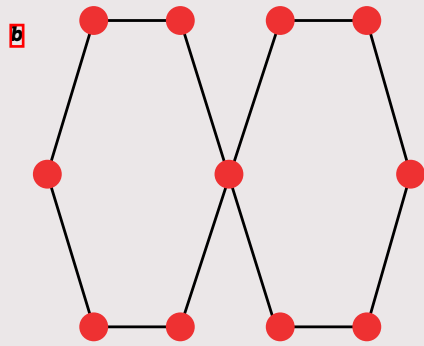
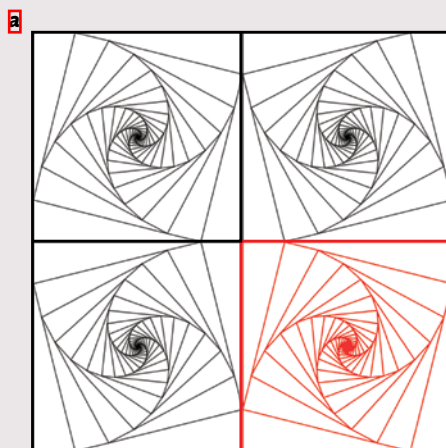
Prenons l'exemple de $x=4$ et $y=23$. L'entier 23 s'écrit 10111 en base 2; son quatrième chiffre en partant de la droite et en comptant à partir de 0 est un 1 (souligné): il y a donc une arête entre 4 et 23 dans le graphe de Rado. Il n'y en a pas entre 3 et 23. Il y en a une entre 2 et 23, entre 1 et 23 et entre 0 et 23.

Le graphe de Rado est universel dans le sens suivant: il contient tout graphe fini et même tout graphe infini. Qu'il puisse exister

3

UN GRAPHE CONTENU DANS UN AUTRE

On dit qu'un graphe H est un sous-graphe de G (ou que H est contenu dans G, ou que G contient H) si les nœuds de H sont des nœuds de G, et si les arêtes de H se déduisent des arêtes de G. Si H est isomorphe à un sous-graphe de G, on dit aussi que H est contenu dans G. Exemple 1 : la partie en rouge du graphe infini dessiné ci-dessous (a) est un sous-graphe infini de ce graphe. Exemple 2 : le graphe (b) ci-dessous contient le graphe cyclique à 6 nœuds, et le contient même deux fois, mais il ne contient pas le graphe linéaire à 11 nœuds, car quand on prend un sous-graphe d'un graphe G, on doit prendre toutes les arêtes de G qui joignent les nœuds retenus. Exemple 3 : le graphe ligne $0 - 1 - 2 - \dots - (-3) - (-2) - (-1) - 0 - 1 - 2 - 3 - \dots$ est inclus dans le graphe. Exemple 4 : Le graphe complet à 6 nœuds (chaque nœud est lié à tous les autres) est contenu dans le graphe complet à 7 nœuds.



Un graphe contenant tout graphe fini et tout graphe infini est étonnant: toutes les structures de graphes sont donc là, cachées dans cette histoire de décomposition en base 2 qui fixe les arêtes du graphe de Rado! Mais il y a encore d'autres surprises.

Nous donnons les idées des démonstrations de ce que nous affirmons. Comprendre est à la portée de chacun, moyennant un petit effort. Bien des démonstrations pour les nombres universels n'exigent rien d'autre qu'un peu d'abstraction et de concentration, et il en est de même ici. Cependant, si les démonstrations vous rebutent ou vous ennuiant, lisez seulement les affirmations en sautant les justifications entre les mots DÉBUT et FIN, et faites confiance aux chercheurs qui ont découvert et vérifié soigneusement tout cela... moi en particulier, car je n'y croyais pas!

Avant d'énoncer la première affirmation, il faut donner la définition suivante, qui sera le pivot de tous les arguments.

L'EXTENSION AU CENTRE DE TOUT

On dit qu'un graphe infini G a la propriété d'extension si, pour tout couple E et F d'ensembles finis disjoints de nœuds de G , il existe un nœud N de G qui est lié à chaque nœud de E et à aucun de F (idée très schématiquement illustrée ci-dessous).

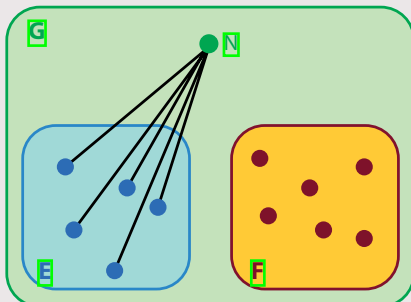
On montre qu'un graphe ayant cette propriété (c'est le cas du graphe de Rado) contient tout graphe, fini ou infini.

4

LA PROPRIÉTÉ D'EXTENSION

Un graphe infini G possède la propriété d'extension si, pour tout couple E et F d'ensembles finis disjoints de nœuds de G , il existe un nœud N de G qui est lié à chaque nœud de E et à aucun de F (idée très schématiquement illustrée ci-dessous).

On montre qu'un graphe ayant cette propriété (c'est le cas du graphe de Rado) contient tout graphe, fini ou infini.



AFFIRMATION. Le graphe de Rado a la propriété d'extension.

DÉBUT Soit n un entier supérieur à chaque nombre de E et chaque nombre de F . On prend pour nœud celui numéroté N , où N est l'entier dont le développement binaire comporte n chiffres binaires (c'est donc un nombre assez grand) et qui est tel qu'il y a un 1 en position e pour chaque nœud e de E et un 0 en position f pour chaque nœud f de F . Si par exemple $E = \{0, 2, 4, 8\}$ et $F = \{3, 7\}$, on prendra $N = 100010101$. **FIN**

Le point important de cette petite théorie réside dans l'énoncé suivant.

AFFIRMATION. Deux graphes infinis qui ont la propriété d'extension sont isomorphes; autrement dit, ils ont exactement la même structure, qui est donc, compte tenu de l'affirmation précédente, celle du graphe de Rado.

DÉBUT Soient G et H deux graphes ayant la propriété d'extension. Notons $a_0, a_1, \dots$ les nœuds de G et $b_1, b_2, \dots$ ceux de H . Pour montrer que G et H sont isomorphes, on va renommer progressivement leurs nœuds de telle façon qu'avec les nouveaux noms, il sera évident que G et H ont exactement les mêmes arêtes.

Étape 0. On choisit un nœud quelconque c_0 de G et un nœud quelconque c'_0 de H .

Étape 1. On choisit maintenant un nœud c_1 de G différent de c_0 . Dans H , on prend alors, pour c'_1 , un nœud différent de c'_0 qui est lié à c'_0 si c_1 est lié à c_0 dans G , et qui n'est pas lié à c'_0 sinon. Un tel c'_1 existe nécessairement, car H vérifie la propriété d'extension. Le sous-graphe de G déterminé par c_0, c_1 et le sous-graphe de H déterminé par c'_0, c'_1 sont, par construction, isomorphes.

Étape 2. On prend maintenant un nœud c_2 quelconque de H différent de c'_0 et de c'_1 . On choisit dans G un nœud c_2 qui est lié à c_0 et c_1 dans G de la même façon que c'_2 est lié dans H à c'_0 et c'_1 . C'est possible d'après la propriété d'extension de G . Le sous-graphe de G déterminé par c_0, c_1, c_2 et le sous-graphe de H déterminé par c'_0, c'_1, c'_2 sont, par construction, isomorphes.

Étape 3. On prend maintenant un nœud c_3 quelconque de G différent de c_0, c_1 et c_2 . On choisit dans H un nœud c'_3 qui est lié à c'_0, c'_1 et c'_2 dans H de la même façon que c_3 est lié dans G à c_0, c_1 et c_2 . C'est possible d'après la propriété d'extension de H . Et ainsi de suite.

On continue de cette façon en s'arrangeant pour que les choix faits alternativement dans G et H épuisent bien tous les nœuds de G et H , ce qui est possible en prenant à chaque étape le nœud de plus petit numéro non déjà utilisé. Par construction, les liens dans G entre $c_0, c_1, c_2, \dots$ et les liens dans H entre $c'_0, c'_1, c'_2, \dots$ sont exactement les mêmes. Cela montre que G et H ont exactement la même structure: ils sont isomorphes.

Tous les graphes ayant la propriété d'extension sont donc isomorphes entre eux; il n'y a donc qu'une seule sorte de graphe ayant la propriété d'extension, et cette structure est celle du graphe de Rado. **FIN**

On démontre aussi, par un procédé très proche du précédent, que tout graphe ayant la propriété d'extension contient tout graphe fini ou infini, autrement dit qu'il est universel.

TOUT GRAPHE ALÉATOIRE ET INFINI DONNE LE GRAPHE DE RADO

On construit un graphe aléatoire infini en se donnant un ensemble infini de nœuds $a_1 a_2 a_3 \dots a_n \dots$ et en tirant à pile ou face pour chaque couple de nœuds $a_i a_j$ afin de déterminer si on les lie par une arête (par exemple oui si c'est pile, non si c'est face). On prouve qu'un tel graphe est isomorphe au graphe de Rado.

Les graphes finis aléatoires sont définis comme précédemment: un tirage aléatoire détermine si on place une arête entre deux nœuds. Leur étude conduit à une théorie importante qui donne lieu à une multitude de résultats délicats et profonds, dont une bonne partie est due au célèbre et prolifique mathématicien hongrois Paul Erdős.

Le résultat concernant l'unicité du graphe de Rado rend impossible une théorie analogue pour les graphes aléatoires infinis, qui sont tous isomorphes. Cette situation est inhabituelle, car en général le passage du fini à un infini fondé sur les mêmes idées donne naissance à une théorie plus complexe et difficile. Ici, c'est l'inverse: la théorie des graphes aléatoires finis est riche, difficile et complexe, tandis que la théorie des graphes aléatoires infinis se réduit à peu de choses et est au fond assez simple. Dans leur livre *Probabilistic Methods in Combinatorics* (1974), Erdős et Joel Spencer l'ont affirmé clairement: le résultat d'unicité des graphes infinis aléatoires «démolit la théorie des graphes infinis aléatoires».

UNE INVARIANCE EXTRÊME

Un peu comme les nombres universels, dont chacun contient tous les autres et qui sont résistants par modification finie, le graphe de Rado est lui aussi invariant par modification finie. Mais, cette fois, le résultat de la modification est plus spectaculaire, puisque le graphe d'une modification est le graphe lui-même: enlever des morceaux finis ne le change pas et le couper en deux le maintient intact. Mieux que les fractales, figures que l'on retrouve en plus petites en elles-mêmes, ici on retrouve le graphe de Rado en lui-même, exactement, sans la moindre modification.

AFFIRMATION. En enlevant un nombre fini de nœuds, ou en changeant un nombre fini d'arêtes, on ne change pas le graphe de Rado. En séparant en deux le graphe de Rado (on

sépare les nœuds en deux sous-ensembles disjoints et complémentaires), l'un des morceaux est le graphe de Rado.

A chaque fois, la démonstration se fonde sur la propriété d'extension dont on voit qu'elle persiste. Notons que la dernière pro-

On a un sentiment d'étrangeté et de magie face à cet objet mathématique singulier

priété n'est pas vraie pour les nombres universels: si l'on répartit les chiffres d'un nombre universel en deux, il se peut qu'aucun des deux nombres obtenus ne soit universel: il suffit de mettre tous les 0 dans l'un des morceaux et tous les 1 dans l'autre.

UN LIEN ENTRE NOMBRES UNIVERSELS ET GRAPHES UNIVERSELS

On pouvait s'attendre à ce qu'il existe un lien entre les nombres universels et le graphe universel de Rado. C'est le cas! On commence par associer un graphe infini G_r à chaque nombre réel r compris entre 0 et 1, en procédant de la façon suivante. On écrit r en base 2, $r = 0, a_1 a_2 a_3 \dots$, on prend comme ensemble de nœuds du graphe G_r l'ensemble des entiers relatifs $\dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ et on décide qu'il y a une arête entre deux nœuds n et m , avec $n > m$, si et seulement si le chiffre binaire en position $n - m$ dans r est 1. Le nombre de Champernowne en base 2, $Ch_2 = 0,01101100101110111\dots$, définit un tel graphe. On démontre que le graphe défini par un nombre universel en base 2 a la propriété d'extension et donc qu'il est toujours le même graphe infini: le graphe universel de Rado.

Nous n'avons pas évoqué certaines autres définitions inattendues du graphe de Rado; il en existe par exemple une fondée sur les nombres premiers. Elles accroissent encore le sentiment d'étrangeté et de magie ressentie face à cet objet mathématique singulier. Le monde de l'infini mathématique dépasse parfois l'entendement. Bien que tout se démontre et même quand on comprend chaque point des démonstrations, l'émerveillement persiste... ainsi que, peut-être, un certain doute. ■

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, **Rado graph**, 2018.

C. Biró et U. B. Darji, **Generating infinite random graphs**, *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, vol. 61(3), pp. 847-868, 2018 (arxiv.org/pdf/1205.3198.pdf).

R. Elwes, **Preferential attachment processes approaching the Rado multigraph**, *arXiv:1502.05618v3*, 2017.

M. S. Kurilić et S. Todorčević, **Copies of the random graph**, *Advances in Mathematics*, vol. 317, pp. 526-552, 2017.

P. J. Cameron, **The random graph**, dans *The Mathematics of Paul Erdős*, vol. II (éd. R. Graham et J. Nešetřil), pp. 333-351, Springer, 1997 ([arXiv:1301.7544](https://arxiv.org/abs/1301.7544), 2013).

J.-P. Delahaye, **Les nombres univers**, *Pour la Science* n° 225, pp. 104-107, juillet 1996.

LES AUTEURS



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

DES NANOBULLES MAGNÉTIQUES POUR L'INFORMATIQUE DE DEMAIN

Pour stocker efficacement l'information numérisée, l'idée d'utiliser de petits domaines magnétiques revient au goût du jour, avec une nouveauté: les skyrmions.

Dans les années 1970, la technique d'avenir pour le stockage de l'information numérique était les mémoires à «bulles magnétiques». Le développement des mémoires flash, fondées sur de l'électronique, a rendu ces dispositifs obsolètes. Mais plus récemment, de nouvelles entités de la même famille ont fait leur apparition dans les laboratoires: les skyrmions magnétiques. Comme les bulles magnétiques, les skyrmions sont de petites régions d'un mince film magnétique où l'aimantation est orientée de façon particulière. De taille nanométrique, manipulables par des courants électriques très faibles, stables grâce à des propriétés de nature topologique, ils constituent une alternative intéressante aux électrons pour les techniques numériques de demain.

Pour nous éclairer sur la physique à l'œuvre dans ces systèmes, commençons

par analyser un dispositif mécanique qui fournit une bonne analogie (voir le dessin ci-contre). Sur un long axe horizontal, sont fixés à égales distances de petits pendules lestés pouvant tourner librement autour de l'axe. Évidemment, abandonnés à eux-mêmes, tous ces pendules pendent verticalement.

UNE ANALOGIE AVEC UNE ONDE DE PENDULES

Mais ajoutons des ressorts (ou un fil élastique) reliant leurs extrémités, et faisons faire au pendule d'un des deux bouts un tour complet: il se crée une torsion qui reste localisée sur une petite zone (contrairement à ce que l'on observerait avec un ruban de tissu, par exemple).

La largeur de cette zone résulte d'un compromis énergétique. Si elle est étroite, les ressorts sont très tendus et l'énergie élastique emmagasinée est importante. En revanche, peu de pendules sont

La chaîne de pendules et les bulles de savon présentent des analogies avec les «bulles» magnétiques dans des films minces.

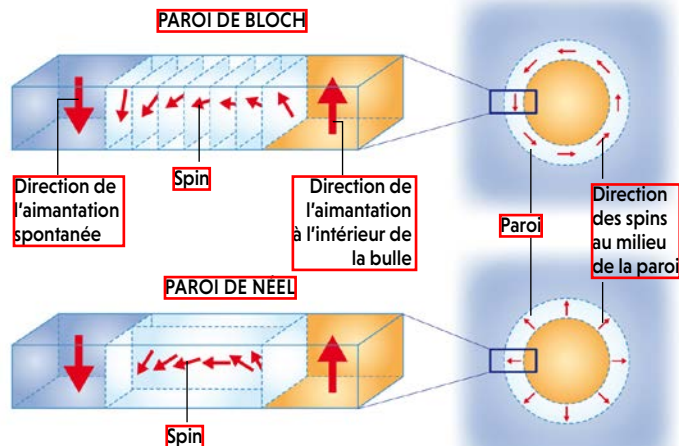
soulevés par rapport à leur position au repos: l'énergie gravitationnelle correspondante est faible. C'est l'inverse si la zone est étendue. Cette zone sera donc d'autant plus large que les ressorts sont rigides ou que les pendules sont légers.

Faisons tourner l'un des pendules de ce motif: la modification de la tension des ressorts induit une rotation des pendules voisins et ainsi de suite, de proche en proche, de sorte que le motif reprend sa forme initiale, mais en s'étant décalé le long de l'axe. Ce comportement est analogue à celui d'une onde qui se propage dans un milieu: les particules (ici les pendules) qui composent le milieu n'avancent pas avec l'onde, mais restent en place. Nous avons ainsi créé le motif d'une onde solitaire, aussi nommée soliton.



BULLES MAGNÉTIQUES SUR FILM

Un film mince ferromagnétique présente une aimantation spontanée perpendiculaire au film, par exemple dirigée vers le bas. En appliquant localement un champ magnétique intense, on peut y créer des domaines (en orange) où l'aimantation est de sens opposé. Les « parois » de ces bulles magnétiques sont des zones de transition où l'orientation des spins (les aimants microscopiques constitués par les atomes ou les molécules) passe progressivement d'une direction à son opposée. Selon le plan dans lequel l'orientation des spins tourne, on distingue les « parois de Bloch » et les « parois de Néel ». Cela dépend du matériau.



UNE STABILITÉ D'ORIGINE TOPOLOGIQUE

Ce soliton a une propriété remarquable: hormis aux extrémités du dispositif, il n'est pas possible de le détruire, à moins de briser un ressort. Il est protégé par un verrou topologique, sa torsion totale (le nombre de tours qu'on lui a fait faire) étant un invariant. C'est ce qui assure sa stabilité.

Quel est le rapport avec les skyrmions et les bulles magnétiques? Ces entités sont créées dans des films minces ferromagnétiques, qui présentent une aimantation spontanée perpendiculaire au film. L'aimantation résulte des fortes interactions entre les spins – des boussoles microscopiques – d'atomes voisins, interactions qui tendent à les orienter

dans la même direction. Ces forces sont analogues à nos ressorts. Et la gravité est remplacée par le rôle du réseau cristallin qui, en l'absence de perturbations, détermine que l'orientation est perpendiculaire au film.

Supposons que cette orientation soit vers le bas. Que se passe-t-il si l'on redresse des spins vers le haut en appliquant localement un champ magnétique intense, c'est-à-dire si l'on inverse l'aimantation d'une petite région? Le domaine ainsi créé de spins orientés vers le haut est instable, mais on le stabilise aisément en maintenant un tout petit champ magnétique. Ce domaine s'entoure alors d'une « paroi », plus ou moins épaisse, où l'orientation des spins passe progressivement d'une direction à son

opposée à mesure qu'on la traverse (voir la figure ci-dessus).

L'énergie nécessaire à la création de cette paroi est tout à fait analogue à la tension de surface d'une gouttelette d'eau ou d'une bulle de savon. C'est pourquoi le compromis énergétique fait émerger des domaines de forme circulaire, de la même façon que, à trois dimensions, les bulles et les gouttes sont sphériques.

Comme avec notre soliton mécanique, il est possible de déplacer la bulle magnétique le long du film en agissant sur

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



Les spins de la paroi. Pour ce faire, on applique un champ magnétique non uniforme, choisi de façon appropriée.

En effet, on montre qu'un tel champ magnétique agit sur les spins au sein de la paroi, qui sont moins figés par leurs interactions avec le cristal que les autres, et déplace la configuration magnétique correspondante. Il s'ensuit un déplacement de la paroi, donc de la bulle. Le phénomène est analogue à celui évoqué pour le soliton mécanique: lorsqu'on fait pivoter l'un des pendules de la zone de torsion dans la chaîne de pendules décrite plus haut, cette zone de torsion se déplace le long de l'axe de rotation des pendules.

En pratique, dans les techniques développées dans les années 1970, ces bulles faisaient quelques dizaines de micromètres. On déposait sur le film des plots constitués d'un matériau dont on pouvait contrôler facilement l'aimantation et le champ magnétique non uniforme qu'elle crée. Avec des géométries bien choisies, on formait des pistes de plots et l'on pouvait faire passer d'un plot à l'autre les bulles magnétiques.

Ainsi, alors qu'avec une bande magnétique ou un disque dur, c'est le support qui se déplace pour amener l'information à la tête de lecture, il n'y avait dans ces dispositifs aucune pièce mobile et c'était l'aimantation qui se déplaçait. Cela améliorerait considérablement la fiabilité des supports d'information, et la technique a donc suscité beaucoup d'espoirs.

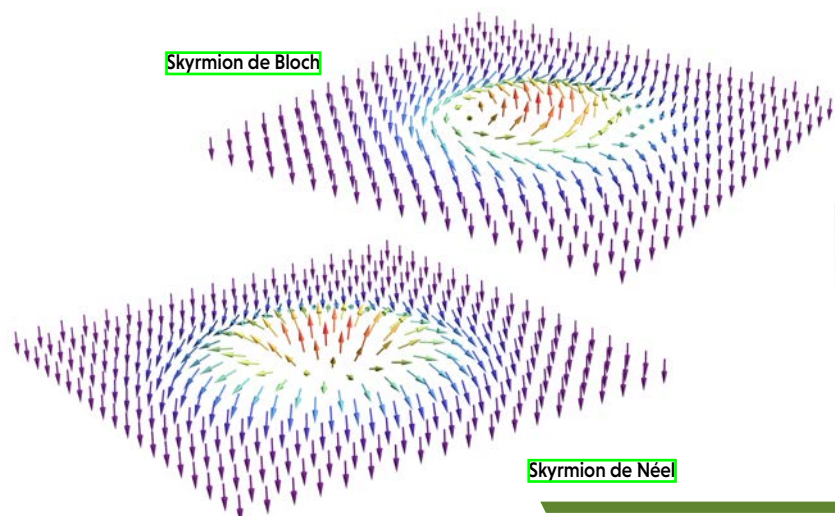
DES BULLES DE PLUS EN PLUS PETITES

En 1971, IBM a livré à la Nasa une mémoire à bulles de 52 bits pour démontrer le potentiel de ce dispositif pour remplacer, dans l'espace, les enregistreurs magnétiques à bande. Plusieurs utilisations commerciales ont suivi, par exemple en 1984 pour la cartouche du jeu vidéo d'arcade Konami. Mais les mémoires à bulles ont totalement disparu à la fin des années 1980 avec le développement des mémoires flash et des techniques apparentées.

Les développements récents de l'électronique de spin (la spintronique) ont cependant remis ces idées dans l'actualité, avec quelques ingrédients nouveaux. Il s'agit désormais de « skyrmions », domaines magnétiques de taille nanométrique et non plus micrométrique, ce qui permet de gagner en densité d'information. À cette échelle, il n'y a plus de distinction entre le domaine magnétique et sa paroi. Ne subsiste qu'une structure où

LE SKYRMION MAGNÉTIQUE

À l'origine, les skyrmions sont des configurations topologiques imaginées dans les années 1960 par le Britannique Tony Skyrme, dans le cadre de la physique des particules. Depuis une dizaine d'années, ils ont acquis une existence plus concrète dans le contexte du magnétisme : les skyrmions magnétiques correspondent à des bulles magnétiques réduites à l'extrême, c'est-à-dire des bulles dont l'intérieur est réduit à un seul spin (d'orientation opposée à l'aimantation spontanée du film magnétique). Leur taille nanométrique permettrait d'augmenter la densité de stockage de l'information numérique.



l'aimantation varie progressivement, avec en son centre un spin d'orientation opposée à celle de l'aimantation du reste du matériau (voir la figure ci-dessus).

Enfin, la structure des spins est l'équivalent bidimensionnel du soliton topologique unidimensionnel que nous avons vu avec notre système mécanique. L'analogie est délicate et profonde, mais la topologie algébrique nous apprend que dans cette situation, il y a aussi un nombre conservé, un équivalent du nombre de tours. Un skyrmion ne peut donc pas se débobiner sans se déchirer.

De fait, cela signifie que détruire un skyrmion a un coût énergétique élevé et qu'il est donc stable. On sait aujourd'hui former des skyrmions à température ambiante et les déplacer. Contrairement aux bulles, cependant, cela ne nécessite pas de champs magnétiques inhomogènes. Grâce au couplage entre propriétés électriques et magnétiques des matériaux dans lesquels les skyrmions sont inscrits, on peut les manipuler avec de très faibles courants électriques. Les progrès sont considérables: on sait déjà réaliser des portes logiques OU et ET en utilisant des skyrmions. Est-ce la promesse de l'apparition d'une nouvelle spintronique dans le monde numérique? L'avenir nous le dira. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Fert et al., **Magnetic skyrmions : Advances in physics and potential applications**, *Nature Reviews Materials*, vol. 2, article 17031, 2017.

A. Fert et al., **Advances in the physics of magnetic skyrmions and perspective for technology**, prépublication arXiv (<https://arxiv.org/abs/1712.07236>), 2017.

A. Bernard-Mantel et al., **The skyrmion-bubble transition in a ferromagnetic thin film**, *SciPost Physics*, vol. 4(5), article 027, 2018 (<https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.4.5.027>).

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL 1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pouirlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre <i>Le temps des algorithmes</i> de Gilles Dowek & Serge Abiteboul (74651175)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 99,80€	79€ Au lieu de 131,40€	99€ Au lieu de 191,40€
	41 % de réduction *	40 % de réduction *	48 % de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG18NOE



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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**
12 n° du magazine papier
59€
Au lieu de 99,80€
- ☐ **FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
79€
Au lieu de 131,40€
- ☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne
99€
Au lieu de 191,40€

Reduction 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 31/03/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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.

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

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

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

Signature obligatoire :

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
chercheur
au Service
d'astrophysique
du CEA à Saclay



J.-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
du CNRS au Muséum
national d'histoire
naturelle, à Paris

QUAND LES ARTHROPODES ATTAQUENT



Araignées, fourmis et criquets ont inspiré de nombreuses œuvres de fiction. Pourquoi? Parce qu'ils réveillent des peurs ancestrales. Mais aussi parce que beaucoup de ces petites bêtes sont des spécialistes de l'invasion.

Beaucoup d'extraterrestres de la science-fiction ou de monstres du fantastique sont des envahisseurs. Sauvages, désordonnés ou au contraire capables de coloniser une ville ou une planète tout entière, ces espèces belliqueuses débarquent en nombre et disposent d'une stratégie, voire d'une technologie, meurtrière qui nous échappe.

Pour jouer sur nos peurs, les auteurs et les réalisateurs attribuent souvent à ces extraterrestres des caractéristiques propres aux arthropodes. Ces derniers grouillent, nagent, rampent et résistent à tout – ou presque. Pas étonnant alors qu'ils suscitent aversion, dégoût et peurs irraisonnées (comme l'arachnophobie, titre du film de Frank Marshall, 1990). Ce choix des arthropodes est d'autant plus pertinent que nombre de ces animaux sont passés maîtres dans l'art de l'invasion. Un rôle plus vrai que nature!

Mais qui sont les arthropodes? Ces animaux bilatériens (ayant un plan de

symétrie séparant un côté gauche et un côté droit) présentent à la fois un corps segmenté, des membres articulés (souvent plus de deux paires) et un squelette externe (exosquelette) généralement constitué de chitine, un polymère glucidique naturel et très résistant.

Ils regroupent notamment les crustacés, les insectes, les arachnides (araignées, scorpions et acariens) et les myriapodes, l'ensemble formant un clade, c'est-à-dire un groupe naturel descendant d'un unique ancêtre commun. Le terme *arthropoda* (du grec *arthron*, articulation et *podos*, le pied) a été créé en 1829 par Pierre-André Latreille, ancien diacre royaliste devenu naturaliste et entomologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

En systématique, les arthropodes sont importants à plus d'un titre: ils regroupent plus d'un million d'espèces actuelles (soit environ 78% du règne animal connu, voir l'encadré page 90) et sont à la base de nombreux réseaux trophiques (chaînes

alimentaires). Au cours de leur longue histoire, qui remonte à plus de 540 millions d'années, ils ont connu un succès évolutif sans précédent. Ils constituent actuellement la plus grande biomasse animale connue aussi bien dans l'eau (avec les crustacés – krill et copépodes – qui forment le zooplancton) que sur la terre ferme (avec les insectes et notamment les 12500 espèces connues de fourmis, qui représentent des millions de milliards d'individus). Bref, par leur longévité évolutive et leur supériorité numérique, les arthropodes nous dépassent largement!

NUISIBLES OU INVASIVES

Par ailleurs, on constate que beaucoup d'arthropodes sont des espèces nuisibles ou invasives – anglicisme qu'il convient ici de remplacer par « envahissantes ». Ces termes anthropocentriques véhiculent en fait des notions différentes en écologie.

Une espèce nuisible (ou ravageuse) est composée d'individus dont la reproduction est devenue incontrôlable et dont



Dans le film
Starship Troopers
(Paul Verhoeven, 1997),
les humains sont
en guerre contre les
« Arachnides », une espèce
extraterrestre d'insectes
géants et belliqueux.

les effectifs impressionnants font des dégâts considérables dans leur propre environnement. Chez les arthropodes, c'est le cas de certains insectes orthoptères (criquets, sauterelles) qui profitent des cultures souvent intensives de leur plante favorite, la « plante-hôte », pour se développer et proliférer.

Ces orthoptères se répandent très rapidement et forment de véritables armées de mandibules – végétariennes chez les criquets, omnivores ou carnivores chez les sauterelles – dès que les conditions environnementales (hygrométrie, température, etc.) leur sont propices.

Quand la nourriture est disponible en abondance, la population augmente de façon considérable, car la capacité de reproduction dépasse largement la mortalité. Si la densité de population dépasse un seuil critique (environ 2000 individus par hectare, selon les espèces), les individus passent d'une phase (ou forme) solitaire et plutôt inoffensive à une phase grégaire et carrément vorace

– les entomologistes parlent de polymorphisme phasaire.

Ainsi, le criquet migrateur (*Locusta migratoria*) et le criquet puant (*Zonocerus variegatus*) ont vite été classés comme ravageurs par le Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) à cause des dégâts considérables qu'ils infligent aux cultures et donc indirectement aux populations en Afrique, en Inde et en Amérique du Sud notamment. À Madagascar, le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) pullule sous la forme de centaines d'essaims qui déciment régulièrement les cultures.

Un seul essaim contient des dizaines de millions d'individus et forme un nuage de plusieurs kilomètres de long, se déplaçant à environ 20 kilomètres par heure et capable d'engloutir jusqu'à 1000 tonnes de végétation par jour ! Ce fléau n'est pas nouveau et a été décrit en Égypte dès l'Antiquité : « De la fumée sortirent des sauterelles qui se répandirent sur la terre [...]

Ces sauterelles ressemblaient à des chevaux préparés pour le combat ; il y avait sur leurs têtes des couronnes semblables à de l'or [...] Elles avaient des cuirasses comme des cuirasses de fer, et le bruit de leurs ailes était comme un bruit de chars à plusieurs chevaux qui courent au combat. » (Apocalypse 9:1-12). Aujourd'hui encore, ces insectes, que parfois rien n'arrête, peuvent encore marquer les esprits comme dans le film *Locusts, les ailes du chaos* (David Jackson, 2005), où des sauterelles monstrueuses et génétiquement modifiées envahissent les États-Unis.

Au-delà des orthoptères, de nombreux autres arthropodes peuvent aussi représenter de terribles menaces tant

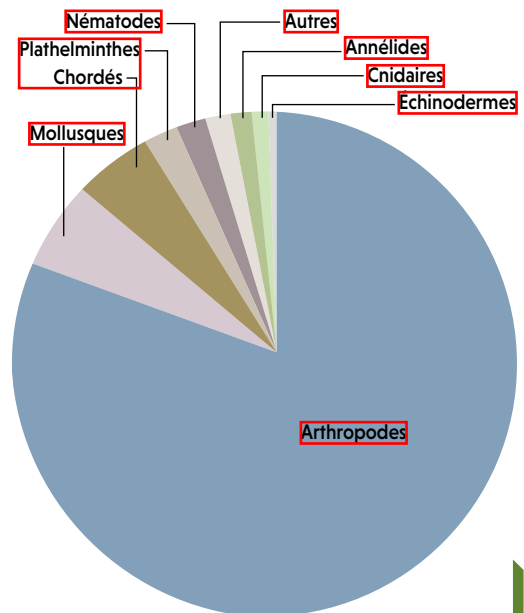
Les auteurs ont publié :
**Combien de doigts
a un extraterrestre ?**,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2016).



LE PLUS GRAND GROUPE D'ESPÈCES

Dans le règne animal (métazoaires, environ 1 345 000 espèces connues), les arthropodes constituent l'embranchement qui contient le plus d'espèces. Ils sont notamment caractérisés par un corps segmenté et des pattes articulées. Les arthropodes comprennent quatre grands groupes : les hexapodes (6 pattes, dont les insectes), les chélicérates (8 pattes, dont les arachnides), les crustacés (10 pattes) et les myriapodes (nombreuses pattes).

EMBRANCHEMENT ANIMAL	NOMBRE D'ESPÈCES CONNUES	%
ARTHROPODES	1 088 000	80,8
Hexapodes (insectes, collembolés...)	917 000	58,2
Chélicérates (arachnides, acariens...)	106 000	7,9
Crustacés	51 000	3,8
Myriapodes (mille-pattes, iules...)	14 000	1,0
MOLLUSQUES	72 000	5,4
CHORDÉS (vertébrés, ascidies...)	67 000	5,0
PLATHELMINTHES (vers plats)	30 000	2,2
NEMATODES (vers ronds)	26 000	1,9
ANNELIDES (vers annelés)	19 000	1,4
CNIDAIRES (méduses, anémones...)	13 000	1,0
ECHINODERMES (oursins, astéries...)	7 000	0,5
AUTRES (éponges, tardigrades...)	25 000	1,8



Les arthropodes sont le plus grand embranchement animal en termes d'espèces (80,8%) et d'individus. Parmi eux, les insectes représentent près de 1 million d'espèces, et on en découvre encore plusieurs milliers chaque année. En 2015, Nigel Stork, de l'université Griffith, en Australie, et ses collègues ont utilisé plusieurs techniques pour estimer qu'il y aurait au total près de 1,5 million d'espèces de coléoptères (connues et à découvrir). Selon la même approche, l'ensemble des arthropodes représenterait environ 6,8 millions d'espèces.

physiques que psychologiques. La littérature fantastique et le cinéma de série B exploitent alors le filon en utilisant pratiquement tous les groupes d'arthropodes connus : arachnides (*L'Horrible Invasion*, de John Cardos, 1977, tourné avec de véritables mygales), hyménoptères (*Quand la marabunta gronde*, de Byron Haskin, 1954, avec des fourmis légionnaires), scorpions, mais aussi mantes religieuses, lépidoptères ou encore crustacés.

Le groupe des crustacés comprend d'ailleurs les plus grands arthropodes connus. Le record actuel est détenu par le crabe-araignée géant du Japon, *Macrocheira kaempferi*, de 3,5 mètres d'envergure, dont est peut-être inspiré Onibaba, immense crustacé extraterrestre aperçu dans *Pacific Rim* (Guillermo del Toro, 2013).

Pour faire peur, rien de tel que de multiplier à foison le nombre d'individus ou, mieux encore, de décupler leur taille à la suite de mutations ou d'expériences qui tournent mal, selon les époques : en pleine guerre froide, de nombreux films ont mis en scène des arthropodes démesurés dont les transformations sont causées par la radioactivité, comme c'est le cas des fourmis géantes qui détruisent

Los Angeles dans *Des monstres attaquent la ville* (Gordon Douglas, 1954). Mais le summum de l'horreur réside dans l'arthropode qui nous envahit de l'intérieur et par là même nous transforme : c'est le cas d'un coléoptère dans le roman *La Métamorphose*, de Franz Kafka (1915) ou encore d'un diptère dans le film *La Mouche*, de David Cronenberg (1986).

À LA CONQUÊTE DU MONDE

Une espèce envahissante est différente d'une espèce nuisible. Elle prolifère parce qu'elle a été importée (intentionnellement ou non) dans un nouvel écosystème dépourvu de ses prédateurs ou de ses parasites naturels : contrairement à sa cousine nuisible, elle est exogène. Une fois installée dans son nouvel environnement, l'espèce envahissante se diversifie et se propage très rapidement au détriment des espèces indigènes et cause souvent des ravages en déstabilisant l'écosystème local.

Chez les arthropodes, c'est le cas du moustique-tigre (*Aedes albopictus* ou *Stegomyia albopicta* selon les spécialistes) originaire d'Asie du Sud-Est. Ce diptère, un des plus envahissants du monde selon la base de données GISD (Global Invasive Species Database), est vecteur de la

dengue, du chikungunya et de la fièvre Zika. Depuis son arrivée en France en 2004, il est aujourd'hui présent dans quarante-deux départements (notamment ceux du Midi) et sa population ne cesse de croître. Le réchauffement climatique global favorise son expansion, car le nombre de régions où les conditions lui conviennent augmente. Citons également la pyrale du buis (*Cydalima perspectalis*), lépidoptère d'Extrême-Orient importé accidentellement en Europe dans les années 2000, ou encore le «rôdeur mortel», alias *Leiurus quinquestriatus*, dangereux scorpion du Moyen-Orient, qui inquiète actuellement la Drôme provençale.

Les espèces envahissantes ne manquent pas : en Europe, la base de données Daisie (Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe) en dénombre actuellement plus de 12 000. Disponible sur Internet, créée et gérée par des experts internationaux, cette base de données permet de mieux connaître les espèces envahissantes, de sensibiliser les populations et les pouvoirs publics afin de mieux les combattre. Il s'agit aussi de repérer ces espèces aussi rapidement que possible afin de limiter les dégâts – destruction de cultures, de paysages, propagation de maladies et de virus, etc.

Une espèce ne naît pas envahissante, elle le devient quand elle s'implante dans une zone géographique qui lui est favorable – un peu comme une espèce devient nuisible pendant un certain laps de temps. L'envahisseur supplante alors les espèces indigènes par sa capacité de reproduction – foudroyante en l'absence de prédateur – et son comportement parfois agressif, pour ne pas dire vorace.

Un bon exemple est celui du frelon asiatique ou «frelon à pattes jaunes» (*Vespa velutina*), qui décime depuis quelques années les ruchers européens pour nourrir ses larves. Il est beaucoup moins destructeur dans son environnement originel car l'abeille asiatique (*Apis cerana*) développe, contrairement à nos abeilles occidentales (*Apis mellifera*), une stratégie de défense remarquable : dès qu'un frelon s'approche de l'essaim ou de la ruche, les abeilles s'agglutinent sur l'agresseur et battent toutes des ailes jusqu'à ce que celui-ci meure par hyperthermie !

En 2018, Juliette Poidatz, de l'Inra de Bordeaux, et ses collègues ont étudié l'impact de champignons parasites naturels du frelon asiatique pour en contenir l'expansion en Europe. Les résultats de ces travaux ont permis d'esquisser des

stratégies de biocontrôle durable de l'invasion du frelon asiatique et d'évaluer leur efficacité.

ENTRE PROPAGANDE ET HUMANISME

En science-fiction, un extraterrestre est par définition une espèce exogène mais ses intentions ne sont pas forcément mauvaises. Hélas, dès qu'il arbore des traits d'arthropode, l'exogène devient vite envahissant et envahisseur : ce n'est pas pour rien que les pauvres extraterrestres réfugiés et déportés du film *District 9* (Neill Blomkamp, 2009) ressemblent à des crevettes.



Un essaim de criquets regroupe des dizaines de millions d'individus



Nécrophages, prédateurs, parasites, les arthropodes nous fascinent aussi par leurs modes de développement et de communication qui nous échappent – beaucoup sont des animaux sociaux. Dans le film *World Invasion: Battle Los Angeles* (Jonathan Liebesman, 2011), la stratégie d'invasion des aliens est comparée à celle de fourmis, mais héroïquement matée par une armée américaine surpuissante – démonstration de force nommée «cinéma de sûreté nationale» tellement elle frôle la propagande. La même propagande est visible, au deuxième degré fort heureusement, dans *Starship Troopers* (Paul Verhoeven, 1997, adapté du roman éponyme de Robert Heinlein, 1959), où l'armée américaine débarque sur une planète habitée d'arthropodes géants, mais cette fois pour les exterminer.

L'arthropode, aussi repoussant soit-il, peut aussi véhiculer d'autres valeurs : compassion, humanisme... Déjà, dans *Le Voyage dans la Lune* (1902), premier film de science-fiction de l'histoire du cinéma, Georges Méliès dénonçait les méfaits du colonialisme grâce aux Sélénites, extraterrestres lunaires joués par des acrobates du théâtre des Folies Bergère déguisés en arthropodes et attaqués chez eux par une autre espèce envahissante, *Homo sapiens* ! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Poidatz et al., **Indigenous strains of *Beauveria* and *Metharizium* as potential biological control agents against the invasive hornet *Vespa velutina***, *Journal of Invertebrate Pathology*, vol. 153, pp. 180-185, 2018.

D. Strickman, **De nouvelles armes contre les moustiques**, *Pour la Science*, n° 490, pp. 48-55, août 2018.

J.-P. Andreuon, **Des monstres attaquent la ville. Ces bêtes qui nous veulent du mal**, *L'écran fantastique*, Hors-série n° 27, pp. 6-27, 2018.

J.-S. Steyer et R. Lehoucq, **Armures à toute épreuve**, *Pour la Science*, n° 430, pp. 86-87, août 2013.

L'AUTEUR



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

COMMENT L'ÉLÉPHANT TROMPE LE CANCER

Plus les animaux sont de grande taille et vivent longtemps, plus ils devraient présenter des risques élevés de cancer. Or cette prédiction théorique est fautive. L'explication se trouve dans les génomes de la baleine boréale et de l'éléphant d'Afrique.

L'humain a mille fois plus de cellules que la souris et mille fois moins que l'éléphant. Si chaque cellule qui se divise a une probabilité de devenir cancéreuse, l'éléphant devrait avoir un risque un million de fois plus élevé que la souris de développer un cancer. Et cette probabilité devrait augmenter avec l'espérance de vie. C'est bien ce que l'on observe à l'intérieur d'une même espèce, où les animaux ont globalement le même génome: les gros chiens ont plus de cancers que les petits. Toutefois, chez les animaux d'espèces différentes, ce n'est pas le cas, comme l'a remarqué l'épidémiologiste britannique Richard Peto en 1977: le risque de cancer n'est corrélé ni à la taille ni à l'espérance de vie. Cela suggère que des mécanismes régulateurs particuliers de protection contre le cancer se sont mis en place au cours de l'évolution, autorisant ainsi l'augmentation de

taille. Il était tentant de rechercher de telles originalités évolutives dans les génomes de grands animaux comme la baleine et l'éléphant, ce qui a été fait récemment avec succès.

LE SECRET DE LONGÉVITÉ DE LA BALEINE BORÉALE

La baleine boréale (*Balaena mysticetus*) peut atteindre 18 mètres pour une masse avoisinant les 100 tonnes et son espérance de vie dépasse les 200 ans: une candidate idéale, d'autant que l'animal le plus proche phylogénétiquement, la baleine de Minke (*Balaenoptera acutorostrata*), est bien plus petit (8 mètres, 8 tonnes, 40 ans). En comparant leurs deux génomes, on devrait détecter des mutations spécifiques de la baleine boréale qui ont pu l'aider à atteindre une telle masse et une telle longévité. Une équipe internationale sous la direction de João Pedro de Magalhães, de l'université

Ses grandes oreilles l'aident à réguler sa température corporelle: en les agitant, il refroidit le sang qui y circule.



On estime qu'ils sont plus de 400 000 dans la savane africaine. Ils sont néanmoins en déclin dans certaines régions, notamment à cause de la fragmentation de leur habitat liée aux activités humaines.

Non seulement sa peau est craquelée, mais elle comporte des microcrevasses interconnectées qui lui permettent de retenir 5 à 10 fois plus d'eau qu'une surface plane.

EN CHIFFRES

211

En 2007 en Alaska, un groupe de chasseurs Inuits participait à une chasse traditionnelle à la baleine. Ils ramenèrent quatre animaux. En dépeçant le plus gros, ils trouvèrent, enkystés dans son lard et sa chair, six harpons datant de la fin du XVIII^e siècle, ce qui leur permit d'estimer l'âge de la baleine à 211 ans.

37 millions

C'est le nombre de cellules de l'éléphant de savane. L'humain en compte 1 000 fois moins, et 1 000 fois plus que la souris.

30

Le plus grand animal actuel est la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*), qui mesure environ 30 mètres de long pour 180 tonnes et vit 80 ans en moyenne. Une taille équivalente à celle des plus grands dinosaures, dont certains sauropodes atteignaient une longueur de 40 mètres.

de Liverpool, a entrepris ce travail en 2015. Et de fait, l'analyse comparée des deux génomes lui a permis d'identifier plusieurs gènes impliqués dans la protection anticancéreuse de l'animal. Ainsi, le gène *ERCC1* porte des mutations spécifiques de la baleine boréale. Or ce gène produit une protéine qui contribue à la réparation et à la recombinaison de l'ADN. Ces mutations entraîneraient-elles une meilleure réparation? Cette hypothèse est actuellement testée.

Par ailleurs, le gène *PCNA* de la baleine boréale présente une double originalité: il est dupliqué et, de plus, porte une mutation spécifique qui entraîne, dans la protéine PCNA qu'il code, la substitution d'un acide aminé (les constituants des protéines) à l'endroit où la molécule interagit avec une autre protéine, FEN-1. Or la protéine PCNA forme ce que l'on nomme un clamp glissant, c'est-à-dire une structure en anneau qui, encerclant l'ADN, coulisse le long du brin et participe ainsi à sa réparation. Et la protéine FEN-1 joue également un rôle dans la réparation de l'ADN, ce qui suggère que les mutations du gène *PCNA* renforceraient cette réparation. Là encore, l'étude se poursuit...

LES 20 BOUCLERS DE L'ÉLÉPHANT D'AFRIQUE

En est-il de même chez l'éléphant? C'est ce qu'ont voulu savoir en 2018 Vincent Lynch, de l'université de Chicago, et ses collègues. L'éléphant de savane d'Afrique (*Loxodonta africana*) est le plus gros animal terrestre actuel. Les mâles atteignent 7,5 mètres de long, 4 mètres au

garrot, une masse de 8 tonnes pour une espérance de vie de l'ordre de 70 ans. Les éléphants appartiennent au clade des paenongulés, comprenant également les siréniens (dugongs, lamantins) et les hyracoides, comme le daman des rochers (*Procavia capensis*), qui a la taille et l'allure d'une petite marmotte. Les chercheurs ont ainsi pu comparer les génomes d'animaux proches parents, mais de tailles bien différentes. De plus, de nombreuses données paléontologiques mais aussi génomiques ont été obtenues chez des éléphants récemment éteints comme le mammouth laineux (*Mammuthus primigenius*), l'éléphant à défenses droites (*Palaeoloxodon antiquus*) ou le mastodonte américain (*Mammuth americanum*).

Enfin, en 2015, l'équipe de Joshua Schiffman, à l'université d'Utah, a obtenu un premier résultat spectaculaire. Alors que, comme presque tous les mammifères, nous ne possédons que 1 copie du gène *TP53* (pour *Tumor protein 53*), l'éléphant en a 20! Or ce gène est inactivé chez près de 50% des cancers humains. Le produit du gène est une protéine qui agit lors de lésions de l'ADN en activant des gènes impliqués dans la réparation ou, en cas de dommages importants, dans le déclenchement de l'apoptose, la mort des cellules. Comme toutes les copies de l'éléphant sont fonctionnelles, cette action est très finement régulée chez cet animal.

Ce résultat a amené l'équipe de Vincent Lynch à s'intéresser aux gènes cibles de la protéine TP53. Parmi ceux-ci, les gènes *LIF* (pour *Leukemia inhibitory factor*, ou facteur inhibant la leucémie) B



Éléphant d'Afrique
(*Loxodonta africana*)
Taille : jusqu'à 7,5 m
Poids : jusqu'à 8 tonnes
Longévité : environ 70 ans

produisent de petites molécules – des cytokines – qui, chez les humains, influent sur la différenciation, la prolifération et la survie de nombreux types de cellules. Ces cytokines présentent plusieurs formes. Certaines sont sécrétées à l'extérieur des cellules, mais d'autres nommées LIF-T, privées d'une séquence particulière, restent intracellulaires. Lorsqu'elles sont produites, les cytokines LIF-T induisent l'apoptose de la cellule qui les contient. Or le génome de l'éléphant africain comporte 10 gènes ressemblant au gène *LIF-T*, là où 53 autres mammifères représentatifs des différents ordres (dont l'humain) n'en présentent qu'un seul. Comme les lamantins en ont par ailleurs 12 et les damans 7, une telle expansion du nombre de copies du gène *LIF-T* est caractéristique des paenongulés. Mais, surprise, alors que, comme nous l'avons vu, toutes les copies du gène *TP53* de l'éléphant sont fonctionnelles, aucune de ses copies du gène *LIF-T* ne l'est, sauf une, *LIF-6*. Vincent Lynch a donc décidé de se focaliser sur ce gène particulier.

LE RÉVEIL DU GÈNE ZOMBIE

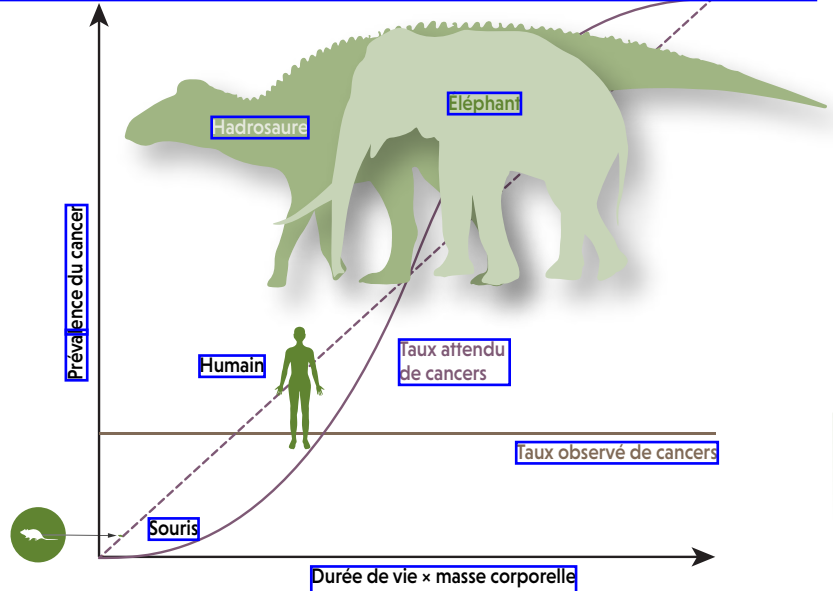
En introduisant la protéine LIF-6 dans des cellules d'éléphant africain par transfection cellulaire (on perméabilise transitoirement la paroi cellulaire par action chimique ou électrique, ce qui permet à la protéine de la traverser), son équipe a montré que, comme les cytokines LIF-T, cette protéine induit l'apoptose. Et quand elle est surexprimée dans les cellules, elle augmente leur réponse apoptotique aux stress qui endommagent l'ADN, ce qui suggère qu'elle contribue à l'extrême sensibilité de l'éléphant à ces stress par rapport aux autres mammifères, y compris le daman, évolutivement proche.

Mais d'où vient ce gène ? Comme toutes les autres copies de *LIF-T*, il est, dans le génome, entouré de transposons, c'est-à-dire des séquences d'ADN mobiles dont beaucoup sont capables, tels des virus, de transcrire l'ARN en ADN. Une telle proximité suggère que, très vraisemblablement, des transposons ont transcrit en ADN des ARN messagers du gène *LIF-T* (les intermédiaires de fabrication des protéines), et ainsi produit plusieurs copies non fonctionnelles de ce gène – des pseudogènes que les cellules n'étaient pas capables de traduire en protéines.

Pourquoi, alors, l'une de ces copies, *LIF-6*, s'exprimerait-elle ? S'appuyant sur une étude fine et convaincante de la

ET LES DINOSAURES ?

Les plus gros animaux terrestres, les dinosaures, sont aujourd'hui disparus. Avaient-ils des cancers ? Certains oui : les paléontologues ont décrit des squelettes avec des tumeurs cancéreuses. Presque exclusivement, il s'agit d'hadrosaures, des ornithischiens à bec de canard, comme *Edmontosaurus*, de corpulence équivalente à celle d'un éléphant. Mais récemment, une vertèbre avec des lésions néoplasiques remontant au Crétacé supérieur a été trouvée au Brésil. Elle appartient à un sauropode de la famille des titanosaures, dont certaines espèces comme *Argentinosaurus* atteignaient 30 à 40 mètres pour une masse entre 80 et 100 tonnes. Les dinosaures actuels, les oiseaux, présentent quant à eux une faible prévalence du cancer pour des raisons encore obscures. Pourquoi surtout les hadrosaures étaient-ils sujets à cette maladie ? Mystère...



Le risque de développer un cancer augmentant avec le nombre de divisions cellulaires de l'organisme, le taux de cancers devrait être plus ou moins proportionnel à la durée de vie et à la masse corporelle (en violet). Or il n'augmente pas (en marron).

composition du gène, Vincent Lynch et ses collègues avancent une hypothèse intéressante : le gène *LIF-6* serait un pseudogène réactivé – un « gène zombie » qui, lorsqu'il est exprimé, tue les cellules. Par phylogénie, on date cette réactivation à 60 millions d'années environ. Par ailleurs, le gène *LIF-6* existait déjà dans les génomes des éléphants éteints (mammouths, mastodontes...), dont la diversification date d'il y a 26 millions d'années. Chez ces animaux, le cancer n'était donc déjà plus un frein à l'augmentation de taille.

Ainsi, au cours de leur évolution, baleines et éléphants n'ont pas résolu le paradoxe de Peto de la même manière face à la dégradation de leur ADN. Les cétacés de grande taille ont développé une réparation plus efficace de l'ADN. Les éléphants, quant à eux, tuent les cellules atteintes avec une très grande sensibilité. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. M. Vazquez et al., **A zombie LIF gene in elephants is upregulated by TP53 to induce apoptosis in response to DNA damage**, *Cell Reports*, vol. 24, pp. 1765-1776, 2018.

M. Tollis et al., **Peto's paradox: how has evolution solved the problem of cancer prevention ?**, *BMC Biology*, vol. 15, p. 60, 2017.

M. Keane et al., **Insights into the evolution of longevity from the bowhead whale genome**, *Cell Reports*, vol. 10, pp. 112-122, 2015.

DONNEZ-NOUS VOTRE AVIS
sur le site de Pour la Science
et tentez de gagner
DE NOMBREUX CADEAUX



Pour participer, rendez-vous sur
rebrand.ly/enquete-site-PLS

L'AUTEUR



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

DE LA LECTURE À DÉVORER

Avec les fibres alimentaires, on peut confectionner de délicieuses pages d'écriture... intellectuellement ou gustativement.

L'avantage des ingrédients sans goût, c'est que l'on peut leur en donner. Naguère, j'avais proposé ici les «geof-froys», émulsions sans goût que l'on obtient en fouettant une huile neutre dans du blanc d'œuf. L'absence de goût de l'émulsion finale est un atout parce que, ainsi, on peut ajouter par exemple une essence de champignons, pour faire une consistance et un goût qu'on n'aurait pas eus en ajoutant des champignons dans une sauce mayonnaise, ou du sucre et de la cannelle pour une version sucrée.

D'autres produits qui n'ont pas de goût? Pensons à ces «fibres», dont les consommateurs ne savent pas toujours très bien ce que c'est, mais que l'on dit «bonnes pour la santé». Il faut les avoir vues une fois pour mieux comprendre et mieux les utiliser: il suffit pour cela d'utiliser une centrifugeuse de cuisine et de préparer un jus de carotte, par exemple. Le jus se sépare d'un résidu solide, légèrement orange, qui est presque de la cellulose à l'état pur. Quel dommage de le jeter!

Cette matière, qui est aussi celle du coton, est faite de fibres, c'est-à-dire d'assemblages de «polymères», longues molécules elles-mêmes formées, pour la cellulose, par la répétition de résidus de glucose. Les polymères n'ont pas de goût: ils ne peuvent interagir avec les récepteurs de saveurs, qui sont des protéines à la surface des cellules réceptrices des papilles. Ni d'odeur, puisqu'ils ne sont pas volatils. Et ils ne sont pas digérés non plus: en trop grandes quantités, les gaz produits par leur fermentation dans la partie basse du système digestif peuvent produire des dérangements, en plus de flatulences.

Un repas constitué de papiers comestibles et goûteux? En préparer un n'est pas une tâche impossible.



Nous avons ainsi des fibres, mais qu'en faire? On peut bien sûr les ajouter à des préparations culinaires telles qu'une mayonnaise ou une confiture pour modifier leur texture. Mais on peut aussi remarquer que le papier est fait de fibres végétales, naturelles ou transformées, réduites en une pâte homogène que l'on étend et sèche pour former une feuille mince. Avec les fibres récupérées de l'extraction du jus de carottes, ne pouvons-nous pas alors fabriquer un papier comestible?

Pour faire la pâte à papier, tout d'abord, ajoutons à ces fibres un liquide ayant de la saveur, de l'odeur, du piquant, du frais, de la couleur... bref, du goût.

La pâte à papier sera étalée sur un linge propre qui laissera couler une partie du liquide, mais le séchage de la feuille conservera des composés de ce dernier. De sorte que quand on soulèvera le papier, on aura une feuille ayant du goût, et qui pourra servir de support ou d'emballage...

Et si d'aventure le papier n'a pas assez de goût, on pourra écrire dessus à l'aide d'un liquide coloré et savoureux, qui ajoutera son goût à celui du papier.

Et c'est ainsi que, si l'on utilise notamment un sirop pour écrire un message, on

obtiendra un... billet doux ou une injonction que les espions pourront ingurgiter après lecture! ■



LA RECETTE

- 1 A l'aide d'une centrifugeuse, récupérer du jus de carotte, d'une part, et des fibres, d'autre part.
- 2 Laver les fibres à grande eau, en les plaçant dans un chinois que l'on met sous l'eau courante.
- 3 Hacher les fibres au robot coupe-légumes pour faciliter la préparation de la pâte.
- 4 Ajouter de l'eau jusqu'à obtention d'une préparation pâteuse. En chauffant, y dissoudre un peu de gélatine, qui servira de « colle ».
- 5 Descendre dans la pâte un morceau de grillage sur lequel on a étalé un torchon blanc et propre. Puis remonter le grillage et le torchon en agitant le tout d'avant en arrière. Une fois le grillage et le papier hors du bac, laisser l'eau s'égoutter (on peut passer un rouleau à pâtisserie pour faire sortir l'eau plus vite).
- 6 À part, cuire doucement le jus de carotte additionné de sucre, d'une pincée de sel, de romarin, de thym citron et d'un peu de jus d'orange.
- 7 À l'aide de ce mélange, peindre le papier. Servir avec un liquide qui apportera l'humidité nécessaire.

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. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.84

SKYRMION

Le terme désigne une configuration topologique particulière, initialement imaginée par le physicien britannique Tony Skyrme pour décrire le proton ou le neutron. Depuis quelques années, les physiciens étudient des « skyrmions magnétiques » au sein de couches minces aimantées. De taille nanométrique, ces entités pourraient servir de bits pour l'informatique future.

P.62

1900 LITRES

En moyenne, la fabrication d'une batterie pour voiture électrique émet autant de gaz à effet de serre que la combustion de 1900 litres d'essence, l'équivalent de 40 000 kilomètres parcourus.

P.22

« La propriété privée est sévèrement menacée par le développement de l'informatique. »

GILLES DOWEK chercheur
en informatique à l'Inria

P.48

7-8

C'est le coefficient d'encéphalisation de l'homme. Ce chiffre est lié au rapport entre la masse du cerveau et celle du corps. Il vaut environ 1 pour le chat, 2 pour le macaque et l'éléphant, et jusqu'à 4,5 pour certains dauphins.

P.52

LE KG NOUVEAU

Ce mois-ci, le kilogramme change de définition officielle, et son étalon ne sera plus le « grand K », ce cylindre de platine iridié conservé sous cloche au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Désormais, cette masse sera définie par la valeur de la constante de Planck, h , qui sera fixée à exactement $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$.

P.88

MACROCHEIRA

Le crabe-araignée géant du Japon, *Macrocheira kaempferi*, a une envergure de 3,5 mètres. C'est le plus grand arthropode actuel connu. Il a peut-être inspiré Onibaba, l'immense crustacé extraterrestre que l'on voit dans le film *Pacific Rim*, de Guillermo del Toro, sorti en 2013.

P.92

PETO

On s'attendrait à ce que, parmi les espèces animales, celles dont les individus sont grands et vivent longtemps devraient souffrir d'un risque de cancer plus élevé. Or ce n'est pas du tout le cas. C'est le « paradoxe de Peto », du nom de l'épidémiologiste britannique qui l'a remarqué en 1977.

MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

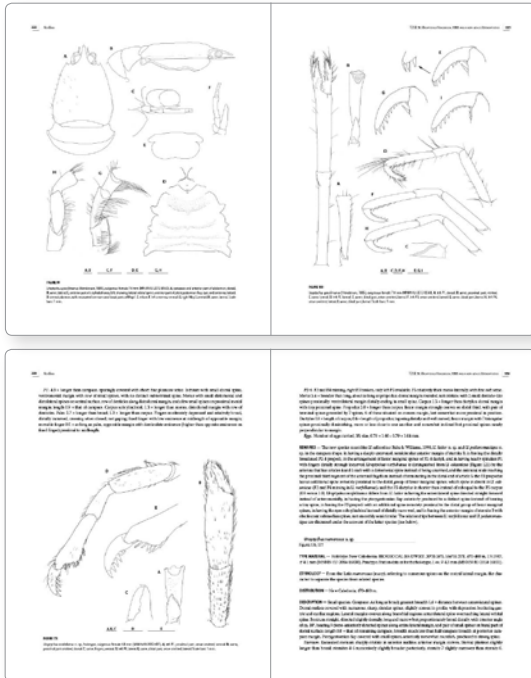
..... zoologie - biologie marine



TROPICAL DEEP-SEA BENTHOS - VOLUME 30

CHIROSTYLIDAE OF THE WESTERN AND CENTRAL PACIFIC:
UROPTYCHUS AND A NEW GENUS
(CRUSTACEA: DECAPODA: ANOMURA)

Keiji Baba



Les galathées du genre *Uroptychus* Henderson, 1888 et du genre *Heteroptychus* n. gen. (Anomura: Chirostylidae) décrites ici sont issues du matériel de la collection du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris, provenant du Pacifique Ouest et Central. Ce matériel comprend 3,784 spécimens représentant un total de 152 espèces dont 100 espèces d'*Uroptychus* et 6 espèces d'*Heteroptychus*, nouvelles pour la science. Le genre *Heteroptychus* n. gen. a été établi pour l'espèce *Uroptychus scambus* Benedict, 1902 et 8 espèces relatives dont une espèce de l'Atlantique Ouest. *Uroptychus edwardi* Kensley, 1977 (maintenant placé dans le genre *Heteroptychus*), précédemment synonymisé avec *U. scambus*, est désormais ré-établi. Les espèces d'*Uroptychus* de l'Indo-Ouest Pacifique et Central sont désormais connues de 219 espèces avec un total de 126 espèces d'*Uroptychus* et six *Heteroptychus* présentes en Nouvelle Calédonie et ses environs (du nord, des îles Salomons vers le sud, la ride de Norfolk en passant par l'est des îles Tonga aux îles Fidji). Les diagnoses de certaines espèces déjà établies sont également décrites dans cette étude afin de définir de manière précise leur statut. Les descriptions des espèces nouvelles et déjà connues sont également détaillées. Une clé des espèces du genre *Uroptychus* est fournie pour l'Indo-Ouest Pacifique et Central ainsi que pour les espèces du nouveau genre *Heteroptychus* au niveau mondial. Le matériel type des espèces connues et dont le statut a été révisé, a été examiné et leurs caractères diagnostiques ont été incorporés dans la clé des espèces.

Keiji Baba, professeur émérite à l'Université de Kumamoto, Japon, travaille sur les crustacés décapode. Il est spécialiste de la taxonomie des galathées. Il a également travaillé sur les Stenopodidés et le développement larvaire des crabes et des bernard l'hermite.

plus de renseignements et de contenus
sur la librairie en ligne des Publications scientifiques

Collection **Mémoires du Muséum**, tome 212 | 220 x 275 mm relié
| texte en anglais | 612 p., 306 figures | Dvdrom fourni
| ISBN 978-2-85653-822-7 | Prix 89€ TTC (84,36 HT) | septembre 2018

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM
ACCÈS PAR PUBLIC
MON COMPTE
MON PANIER
A+ A- A* FR

MÉMOIRES DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
Tropical Deep-Sea Benthos volume 30
Chirostylidae of the Western and Central Pacific: *Uroptychus* and a new genus (Crustacea: Decapoda: Anomura)

LIRE LA SUITE

ACTUALITÉS
PRÉSENTATION DU SERVICE
COLLECTIONS
PÉRIODIQUES
INFOS PRATIQUES
LIBRAIRIE
Rechercher

À LA UNE

Bienvenue sur le site Internet des Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. Vous trouverez ici l'ensemble des collections et périodiques publiés par le Muséum. Les ouvrages et fascicules de périodiques sont disponibles à la vente, via la boutique en ligne, ou bien en venant directement **sur place** ; les articles de périodiques, dans leur version intégrale, sont consultables en ligne.

ACTUALITÉS

L'histoire des sciences naturelles de Cuvier vol.3



Commandez vos ouvrages depuis le **monde entier** sans intermédiaire.
Navigation transversale par **Moteur de recherche**, **Thèmes** et **Géozones**.

Téléchargez gratuitement les articles des revues *Geodiversitas*, *Zoosystema* et *Adansonia* (publiés depuis 2000).
D'autres revues sont consultables ou référencées...

Composez votre propre sélection en éditant un **catalogue** personnalisé au format PDF (A4).

SCIENCEPRESS.MNHN.FR

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses

