

POUR LA



Édition française de Scientific American

SCIENCE

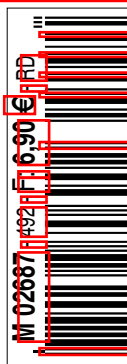
BIOPHYSIQUE

**LES CROCODILES,
UNE MORSURE
SURPUISSANTE**

INFORMATIQUE

**COMMENT CHOISIR
ET PROTÉGER
SES MOTS DE PASSE**

SCIENCES SOCIALES

**LES CONTRÔLES
DE POLICE SONT-ILS
EFFICACES ?**OCTOBRE 2018
N° 492

GÉOMÉTRIE TROPICALE

Un nouveau champ
mathématique
né d'une algèbre
exotique

BEPICOLOMBO**DÉCOLLAGE IMMINENT
À DESTINATION DE MERCURE**

L'actualité de la recherche à l'IRSN



Abonnez-vous à la lettre numérique
AKTIS

Toutes les infos sur [irsn.fr/aktis](https://www.irsn.fr/aktis)

 [irsn.fr/aktis-EN](https://www.irsn.fr/aktis-EN)



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

DÉRAISONNABLE EFFICACITÉ DE L'IMAGINAIRE

Leopold Kronecker, mathématicien et logicien allemand du XIX^e siècle, aurait déclaré: «Dieu a créé les nombres entiers, le reste est l'œuvre de l'homme.» Cette remarque, faite bien sûr dans le contexte des mathématiques, est plus profonde qu'il n'y paraît. En effet, si l'on y réfléchit bien, les entiers négatifs, les nombres rationnels (quotients de nombres entiers) ou irrationnels (comme π ou $\sqrt{2}$) n'ont pas d'existence tangible, objective. On ne les mesure jamais directement. Ce ne sont que des abstractions créées par l'esprit humain pour établir des relations quantitatives entre des objets, que ces derniers soient réels ou non.

La remarque de Kronecker s'applique non seulement au monde des nombres, mais aussi à la géométrie, même élémentaire. L'univers qui nous entoure ne présente aucun point, aucune droite, aucun carré au sens strict. La réalité physique ne nous montre que des approximations de ces idéalizations.

Qui plus est, les inventions (ou découvertes?) des mathématiciens n'ont, bien souvent, aucun lien évident avec la réalité. C'est le cas des nombres complexes, introduits au XVI^e siècle. Un autre exemple est fourni par la géométrie tropicale, nouveau domaine de recherche auquel le mathématicien Antoine Chambert-Loir nous initie dans ce numéro (voir pages 26 à 33).

Que ces inventions n'aient pas d'ancrage dans la réalité physique ne signifie pas qu'elles soient inutiles. Loin de là. Ainsi, la science d'aujourd'hui ne saurait se passer des nombres complexes, bien qu'ils soient imaginaires. Et la géométrie tropicale fournit des résultats intéressants pour d'autres parties des mathématiques, telles que la géométrie algébrique. Les créations mathématiques, aussi déconnectées de la réalité soient-elles, sont parfois d'une «déraisonnable efficacité», pour reprendre les termes du physicien d'origine hongroise Eugene Wigner, qui s'étonnait de la capacité des mathématiques à décrire le monde. ■

SOMMAIRE

N° 492 /
Octobre 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Sa mère est néandertalienne, son père dénisovien
- Le créationnisme, une théorie du complot?
- La relativité générale validée au centre de la Voie lactée
- L'écorce, un treillis qui maintient l'arbre droit
- Des simulations d'avalanches de plaque
- Le ressaut hydraulique revu et corrigé
- Invasion de rétrovirus en cours dans l'ADN des koalas
- Un espoir contre l'arthrose
- Briser en deux les spaghettis
- La plus ancienne tortue à bec

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

« Intelligence artificielle », une expression impropre
Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES

Le raisonnement qui sauva le monde
Gérald Bronner

En couverture:

© Domaine rouge:
Oleg Alexandrov CC BY-SA 3.0;
fond: Shutterstock.com/Slanapotam

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
abonnement *First Voyages*
sur une sélection d'abonnés
en France métropolitaine.

GRANDS FORMATS



P. 34

BIOPHYSIQUE

LES CROCODILIENS, CHAMPIONS DE LA MORSURE

Gregory M. Erickson

Avec quelle force mord un crocodile marin, un caïman ou un gavial? Pendant près de vingt ans, des chercheurs se sont attachés à la mesurer... à leurs risques et périls!



P. 42

PLANETOLOGIE

« MERCURE EST BIEN LOIN D'ÊTRE UNE LUNE-BIS »

Entretien avec
Alain Doressoundiram

Le lancement de la mission spatiale *BepiColombo* est prévu pour ce mois d'octobre ou de novembre. Objectif: la planète Mercure, autour de laquelle les deux sondes embarquées se mettront en orbite en 2025.



P. 56

SCIENCES SOCIALES

DES CONTRÔLES DE POLICE CONTREPRODUCTIFS

Sebastian Roché

Aujourd'hui, il est possible d'évaluer de façon rigoureuse l'égalité devant les contrôles de police et leur efficacité. Résultat: non seulement ils ciblent plus souvent les minorités ethniques, mais ils repèrent peu d'infractions et sapent la confiance dans la police.

Pages 49 à 55

CAHIER PARTENAIRE

LE CITOYEN, CE SCIENTIFIQUE



POUR LA
SCIENCE.FR

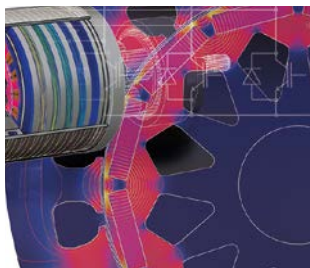
LETTRE D'INFORMATION

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. 66

TECHNOLOGIE

DE MEILLEURS MOTEURS POUR VOITURES ÉLECTRIQUES

Martin Doppelbauer

L'essor des véhicules électriques dépend aussi du développement de leurs moteurs. Lesquels ont connu beaucoup de progrès récents, grâce notamment à de nouveaux matériaux magnétiques.



P. 74

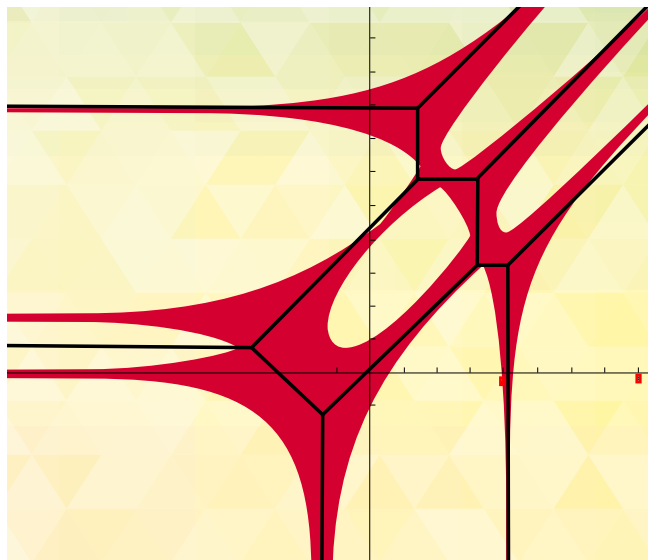
HISTOIRE DES SCIENCES

DES CHERCHEURS PRIS DANS LA GUERRE BIOLOGIQUE

Etienne Aucouturier

Au cours du xx^e siècle, nombre de chimistes et biologistes civils ont accepté de collaborer secrètement avec leurs gouvernements pour trouver des parades à d'éventuelles attaques par armes biologiques, même si cela signifiait souvent aussi développer et produire les armes en question.

À LA UNE



P. 26

MATHÉMATIQUES

QUAND LA GÉOMÉTRIE DEVIENT TROPICALE

Antoine Chambert-Loir

Prendre l'équation d'une courbe, remplacer l'addition et la multiplication par deux opérations plus exotiques, et étudier l'objet géométrique qui en résulte : c'est ce que fait la géométrie tropicale, un domaine récent des mathématiques. Qui profite aussi à la géométrie plus classique.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

L'ART ET LA SCIENCE DES MOTS DE PASSE

Jean-Paul Delahaye

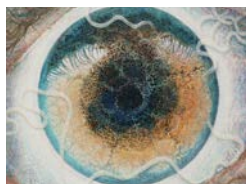
Choisir les mots de passe, les garder en les protégeant, réussir à les dévoiler : la science des mots de passe est un trésor de subtilités.

P. 86

ART & SCIENCE

Vous prendrez bien un ver à l'œil ?

Loïc Mangin



P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Les rebonds du canon de Galilée

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

La pieuvre, un éditeur hors pair

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Fausse cassandre et vrais dangers

Hervé This

P. 98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos
P.18 Livres du mois
P.20 Agenda
P.22 Homo sapiens informaticus
P.24 Cabinet de curiosités
sociologiques

PALÉOANTHROPOLOGIE

SA MÈRE EST NÉANDERTALIENNE, SON PÈRE DÉNISOVIEN



Denny, alias Denisova 11, avait 13 ans, estime-t-on. Bien que de père dénisovien, elle ressemblait peut-être à cet enfant néandertalien (reconstitution d'après le moulage d'un crâne découvert à Devil's Tower, à Gibraltar).

L'étude d'un fragment d'os long découvert dans la grotte de Denisova, en Sibérie centrale, montre qu'il provient d'une jeune fille de mère néandertalienne et de père dénisovien.

Les chercheurs le surnomment Denny. Son vrai nom est Denisova 11. L'individu dont l'équipe de Viviane Slon, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, a séquencé le génome s'est révélé être une jeune fille dont la mère était néandertalienne et le père dénisovien. La première métisse paléolithique de première génération connue !

Denisova est une grotte en Sibérie centrale qui a notamment livré un fossile de phalange auriculaire, nommé Denisova 3, dont le matériel génétique a été étudié.

En 2013, il révèle que ce génome est celui d'une forme humaine inconnue auparavant, la première découverte par la génétique : l'homme de Denisova. Quant à Denisova 11, ce nom désignait l'un des nombreux ossements non identifiés trouvés dans la grotte. L'étude de son collagène ayant révélé son caractère humain, les paléogénéticiens ont entrepris de séquencer l'ADN contenu dans ce fragment d'os long, dont l'aspect suggère qu'il aurait appartenu à un jeune âgé d'environ 13 ans.

Pour ce faire, ils l'ont foré en trois points afin d'obtenir de la poudre d'os. Puis ils se sont livrés aux manipulations

chimiques et à l'amplification (par la technique PCR) nécessaires pour constituer trois immenses collections de fragments d'ADN humain. C'est sur la base de ces « bibliothèques de séquences » que les ordinateurs de l'institut Max-Planck ont reconstitué le génome complet de Denisova 11. En estimant par les gènes les dates de divergence entre la population de Denisova 11, celle de Denisova 3 et celles de plusieurs populations néandertaliennes, les chercheurs en sont venus à proposer que Denisova 11 serait mort il y a 90 000 ans environ.

Son génome révèle aussi qu'il s'agit d'un individu féminin, dont l'ADN mitochondrial (un ADN transmis seulement par les femmes) est néandertalien, tandis que son ADN nucléaire contient des proportions comparables de gènes

néandertaliens et de gènes dénisoviens. D'où l'hypothèse que Denisova 11 pourrait être un hybride de mère néandertalienne et de père dénisovien.

Toutefois, les gènes de Denisova 3 montrent que, depuis la divergence entre les Néandertaliens et les Dénisoviens – il y a quelque 390 000 ans d'après l'horloge génétique –, ces deux populations se sont métissées au moins une fois. Dès lors, une autre façon d'expliquer les gènes de Denisova 11 serait qu'elle ait fait partie d'une population mêlant depuis longtemps les gènes néandertaliens et dénisoviens.

Afin de départager les deux hypothèses, les chercheurs ont choisi d'examiner des gènes particuliers dans le génome de Denisova 11. Il s'agit de gènes qui, chez les Néandertaliens et les Dénisoviens trouvés dans la grotte, sont homozygotes, c'est-à-dire dotés de deux versions (ou allèles) identiques (chez un individu, chaque gène existe en deux exemplaires, l'un hérité du père, l'autre de la mère). Après avoir établi la répartition statistique des allèles de ces gènes dans le génome de Denisova 11, les chercheurs ont constaté que cette répartition s'explique si l'individu est de mère néandertalienne et de père dénisovien, mais pas s'il appartenait à une population hybride.

Que conclure de l'existence de cette métisse ? On savait déjà qu'à diverses époques, Néandertaliens et *Homo sapiens* se sont métissés (au Proche-Orient principalement) et que, en conséquence, tous les Eurasiens ont en eux 1 à 3 % de gènes néandertaliens. On savait également que les Dénisoviens et les *H. sapiens* se sont aussi mélangés, puisqu'une comparaison des gènes de nombreuses ethnies a montré que nos contemporains mélanésiens ont entre 4 et 6 % de gènes dénisoviens, tandis que certaines autres populations, tels les Aborigènes australiens, les Mamanwas des Philippines ou encore les Tibétains en ont des traces. Pour les chercheurs, tous ces indices suggèrent que les populations paléolithiques se mélangeaient souvent. De fait, il semble logique que les petits clans préhistoriques perdus dans la nature au point de ne se rencontrer que très rarement éprouvent le besoin, quand ils se voient, d'échanger des biens, des informations et des idées ; et, manifestement, d'échanger aussi des gènes ! ■

FRANÇOIS SAVATIER

V. Slon et al., *Nature*, vol. 561, pp. 113-116, 2018

Le créationnisme, une théorie du complot ?

Le créationnisme et le complotisme reposeraient en partie sur un mécanisme psychologique commun, le biais téléologique. Ce dernier serait aussi un obstacle pour accepter la méthode scientifique. Sebastian Dieguez, de l'université de Fribourg, en Suisse, commente ce résultat, qu'il a obtenu avec ses collègues.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

SEBASTIAN DIEGUEZ
chercheur
en neurosciences
à l'université
de Fribourg, en Suisse

Qu'est-ce que le biais téléologique ?

La pensée téléologique, ou biais téléologique, est une notion complexe. C'est l'idée que tout objet ou événement a une fin en soi. Dès l'Antiquité, Aristote distinguait quatre types de causes dans la formation des choses, dont la cause finale. Cette dernière implique que toutes les choses ont une fin en soi. Voltaire s'est moqué de cette idée dans son œuvre *Candide* au travers des commentaires de Pangloss : « Remarquez bien que les nez ont été faits pour porter des lunettes ; aussi avons-nous des lunettes. »

Une grande partie de l'histoire des sciences a été un long combat pour comprendre que la bonne question était « comment » sont les choses, et non « pourquoi ». En effet, cette dernière question n'amène pas de réponse satisfaisante pour comprendre le monde.

Au niveau individuel, on retrouve la pensée téléologique chez l'enfant, qui demande avec insistance « pourquoi ? ». Cette pensée s'estompée grâce à l'éducation et à la science, qui apportent des outils de réflexion et des explications complexes et moins intuitives.

Ce biais persiste-t-il chez l'adulte ?

On retrouve le biais téléologique dans bien des situations. Certains pensent, par exemple, que les événements de leur vie personnelle ont un sens caché, sont les marques d'un destin. Dans les documentaires animaliers, le narrateur dit souvent que l'animal se comporte de telle façon pour préserver l'espèce ; cette façon simple de présenter les choses est efficace, mais elle est finaliste et incorrecte.

Le créationnisme, qui affirme que le monde a été créé avec un but, une finalité, est l'exemple le plus marquant de pensée téléologique. Plusieurs études ont montré une forte association entre biais téléologique et croyances créationnistes.

Quel lien établissez-vous entre le biais téléologique et le complotisme ?

Les adeptes de théories du complot pensent que certains événements sont planifiés par des conspirateurs qui ont un objectif. Il y a donc des similarités entre créationnisme et complotisme. Le créationnisme serait d'une certaine façon la théorie du complot ultime, celle de la création de toutes choses avec une fin en soi. Mes collègues et moi avons voulu savoir si le biais téléologique intervenait aussi dans la pensée complotiste.

Nous avons réalisé trois études auprès d'un total de 2 000 personnes avec des questionnaires dont certaines questions évoquaient des pensées téléologiques, complotistes ou créationnistes. Nous avons montré des corrélations fortes entre ces notions. Cela nous porte à penser que le créationnisme et le complotisme reposent au moins en partie sur ce biais cognitif. Nous ne pouvons cependant pas parler d'explication ultime à ces types de croyances, car le facteur téléologique ne représente qu'un élément parmi toutes les raisons qui mènent au créationnisme ou au complotisme. Nous avons aussi remarqué que ce facteur téléologique ne dépend ni de l'âge, ni du niveau d'étude des personnes interrogées.

Quelle conclusion tirez-vous de cette étude sur le rejet de la science ?

Nous avons pensé qu'il était intéressant de mettre en regard le rejet vis-à-vis de la science et les pensées complotistes. Et effectivement, d'après notre étude, il y a un lien très fort entre les deux. Nous concluons que le biais cognitif téléologique est un obstacle fort à l'acceptation de la science, de la méthode scientifique et de l'expertise scientifique. De nos jours, il est important de trouver des solutions à ce rejet, ne serait-ce que pour redonner confiance en l'expertise scientifique. Identifier les blocages cognitifs et attirer l'attention sur ce type d'obstacles est un premier pas. ■

P. Wagner-Egger et al., *Current Biology*, vol. 28, R847-R870, 2018

ASTROPHYSIQUE

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE VALIDÉE AU CENTRE DE LA VOIE LACTÉE

En mesurant le décalage spectral d'une étoile en orbite autour du trou noir central de la Galaxie, des astronomes ont confirmé une nouvelle fois la théorie de la gravitation d'Einstein.

La théorie de la relativité générale d'Einstein indique qu'un objet massif déforme l'espace-temps dans son voisinage. Aux abords de cet objet, le temps s'écoule plus lentement et les longueurs sont dilatées, du point de vue d'un observateur éloigné. ~~L'une des conséquences est que la longueur~~ d'onde d'un rayonnement émis aux abords de l'objet massif nous parvient décalée «vers le rouge», c'est-à-dire que la longueur d'onde est augmentée. On parle de décalage gravitationnel vers le rouge, pour ne pas le confondre avec l'effet Doppler dû au mouvement relatif entre la source et l'observateur. Cette conséquence de la relativité générale a été mesurée sur Terre dès 1959 par Robert Pound et Glen Rebka, aux États-Unis. Récemment, les astronomes du consortium international Gravity, impliquant le CNRS et les observatoires de Paris et Grenoble, ont testé cet effet près du trou noir Sagittarius A*, le trou noir supermassif qui se trouve au centre de la Voie lactée.

Les trous noirs sont des objets compacts qui déforment l'espace-temps au point que même la lumière ne peut s'en échapper. Cependant, autour de Sagittarius A*, des étoiles évoluent jusqu'à des distances très proches du trou noir, à l'instar de l'étoile S2. L'orbite de cet astre est très elliptique, de sorte qu'à son périastre (le point le plus proche de Sagittarius A*), la distance qui sépare l'étoile du trou noir est de seulement 120 fois la distance moyenne Terre-Soleil. À une distance aussi faible, les effets gravitationnels du trou noir sont intenses et le décalage gravitationnel vers le rouge de la lumière émise par l'étoile est important.

Entre 2003 et 2018, les astronomes ont mesuré le décalage vers le rouge de l'étoile S2 à l'aide des spectromètres en proche infrarouge Sinfoni du VLT (*Very Large Telescope*), au Chili, et Nirc2 de l'observatoire Keck, à Hawaï. En mai 2018, l'étoile S2 était à son périastre. Pour avoir une mesure très précise de sa position, les chercheurs ont utilisé un dispositif interférométrique, Gravity (qui a donné son nom à la collaboration), mis en service en 2016 au VLT.

Avec ces données, les membres du consortium ont montré que le décalage vers le rouge



L'étoile S2 est en orbite autour du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Plus l'astre est proche du trou noir, plus la longueur d'onde de sa lumière nous parvient décalée vers le rouge.

2,6 %

**DE LA VITESSE
DE LA LUMIÈRE,
SOIT ENVIRON
25 MILLIONS
DE KILOMÈTRES
PAR HEURE.
C'EST LA VITESSE
DE L'ÉTOILE S2
AU PÉRIASTRE
DE SON ORBITE
AUTOUR DU TROU
NOIR SUPERMASSIF
SITUÉ AU CENTRE
DE LA VOIE LACTÉE.**

observé est compatible avec un effet relativiste dû au champ gravitationnel du trou noir supermassif. Les astronomes restent toutefois prudents. Le modèle utilisé est un système simple, un trou noir supermassif autour duquel gravite une seule étoile. Mais d'autres corps présents dans le voisinage, comme des trous noirs de masse stellaire, pourraient perturber l'orbite de l'étoile S2.

« Nous prévoyons maintenant de réaliser des observations similaires avec des étoiles moins brillantes que S2, mais plus proches de Sagittarius A*. Les effets de décalage vers le rouge seraient alors encore plus importants et permettraient de tester avec une précision supérieure la relativité générale », s'enthousiasme Thibaut Paumard, chargé de recherche du CNRS à l'observatoire de Paris, qui a participé à l'étude.

Pour aller plus loin, les chercheurs espèrent mesurer le décalage (la précession) de l'orbite de l'étoile S2 prévu par la relativité générale par rapport à celui prévu par la théorie de la gravitation newtonienne. Une perturbation supplémentaire que les chercheurs assurent pouvoir mesurer d'ici à 2020. ■

LUCAS STREIT

R. Abuter et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol. 615, article L15, 2018

DU BOSON DE HIGGS AUX QUARKS « BEAUX »

Depuis sa découverte en 2012, les physiciens étudient le boson de Higgs et les façons dont il se désintègre. Les physiciens des expériences Atlas et CMS, au Cern, près de Genève, viennent de détecter sa désintégration en une paire quark-antiquark $b\bar{b}$. Ce « canal » de désintégration du boson de Higgs représente 60 % des cas. Bien que cette voie de désintégration soit la plus probable, sa signature est difficile à distinguer du bruit de fond. C'est ce qui explique pourquoi ce canal a été mis en évidence aussi tardivement.

LA STRATÉGIE DE LA LUCIOLE

Après avoir goûté une luciole (*Photinus pyralis*), les grandes chauves-souris brunes (*Eptesicus fuscus*) apprennent vite que ces insectes sont toxiques et non comestibles. Brian Leavell, de l'université d'État de Boise, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les mammifères volants utilisent deux stratégies pour reconnaître les lucioles : l'écholocation et la vision. Le signal bioluminescent des lucioles sert donc en partie à inciter leurs prédateurs à passer leur chemin !

UNE DALLE SCULPTÉE DU NÉOLITHIQUE

Massongy, sur la rive française du lac Léman, la fouille d'une occupation du Néolithique et de l'âge du Bronze a livré un monument funéraire utilisé à plusieurs reprises entre 3900 et 1000 avant notre ère. Il s'organise autour d'une grande dalle de pierre de 3 mètres de long creusée de cupules (petites coupes) et entourée de nombreuses petites dalles, elles aussi creusées de cupules et incisées de lignes. Plusieurs tombes à inhumation ont été retrouvées, dont celle, datant de l'âge du Bronze final, d'une femme ornée d'un collier d'ambre.

LA MOUSSE À CONTRECOURANT

Faites tourner, par un mouvement de translation circulaire, votre verre rempli d'un liquide : une vague s'y forme. De toute évidence, elle tourne dans le même sens que le geste imprimé. Mais qu'en est-il de la mousse de votre bière ou de votre café ? A priori, elle suit le même mouvement. Pourtant, Frédéric Moisy, de l'université Paris-Saclay et du CNRS, et ses collègues ont montré que, dans certaines conditions, la mousse peut se mettre à tourner dans le sens inverse.

Lorsqu'un mouvement de translation circulaire est imprimé à un verre contenant un fluide, la surface de celui-ci s'incline à cause de la force centrifuge. La hauteur de la « vague » dépend alors de la vitesse de rotation et de l'amplitude du mouvement imposé. Le fluide ne peut jamais aller à contrecourant. Ce sont donc les propriétés des éléments présents à la surface qui peuvent conduire à un mouvement inverse.

Frédéric Moisy et ses collègues ont effectué des expériences avec un verre d'eau animé d'un mouvement constant et de faible amplitude. Ils l'ont saupoudré de divers matériaux qui flottent à la surface (mousse, microbilles de verre, cannelle et poivre). Ils ont augmenté peu à peu la quantité de mousse, par exemple, déposée à la surface. En petite quantité, le mouvement de



Dans un verre de bière en translation circulaire, la fine couche de mousse peut tourner à contresens.

la mousse suit celui de la rotation. Mais au bout d'un moment, la mousse finit par tourner à contresens. Le phénomène s'explique par la force de cohésion entre les bulles de la mousse. Le « radeau » qui se forme se comporte comme un solide bidimensionnel et élastique posé à la surface de l'eau. Lorsqu'il est petit, il est emporté par la vague. Mais quand il devient plus large, ses bords s'approchent des parois du récipient, où le fluide s'écoule plus lentement. Il en résulte des forces de friction et un couple mécanique qui conduit le radeau à tourner en sens inverse. ■

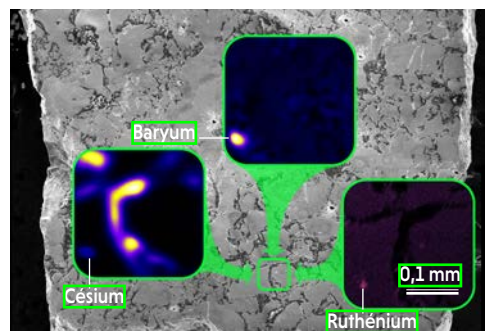
S. B.

F. Moisy et al., *Europhysics Letters*, vol. 122(3), article 34002, 2018

CAPTURE DE CÉSIMUM À OKLO

Dans les mines d'uranium d'Oklo, au Gabon, un processus naturel de réactions en chaîne autoentretenues de fission nucléaire s'est déroulé il y a environ deux milliards d'années et a fonctionné pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Comme les réacteurs industriels, ce réacteur nucléaire naturel a produit des « déchets » radioactifs. Une partie de ces déchets a été évacuée dans les eaux d'écoulement et une autre partie est restée piégée sur place.

Grâce à des techniques d'imagerie, l'équipe d'Evan Groopman, du laboratoire de recherche navale américaine, à Washington, a découvert que des agrégats métalliques de ruthénium, présents au sein du réacteur, ont fixé des isotopes radioactifs de baryum et de césium. Ce résultat est intéressant, car les isotopes 134



L'imagerie des isotopes dans ce minéral d'uranium montre que le ruthénium a fixé le césium et le baryum.

et 137 du césium sont très volatils. Ils sont relâchés dans l'environnement après des catastrophes nucléaires, comme celles de Tchernobyl ou de Fukushima. Le ruthénium constituerait ainsi une piste pour piéger le césium radioactif produit par les réacteurs. ■

L. S.

E. E. Groopman et al., *PNAS*, vol. 115(35), pp. 8676-8681, 2018

L'ÉCORCE, UN TREILLIS QUI MAINTIENT L'ARBRE DROIT

Quelles forces permettent à un arbre de pousser verticalement et, surtout, de maintenir cette posture? Les biomécaniciens ont longtemps pensé que les seules forces internes agissant dans le bois suffisaient. Mais l'équipe de Bruno Clair, du laboratoire Écologie des forêts de Guyane, à Kourou, et du laboratoire de mécanique et génie civil de Montpellier, vient de montrer que cette fonction est aussi assurée par une autre structure: l'écorce.

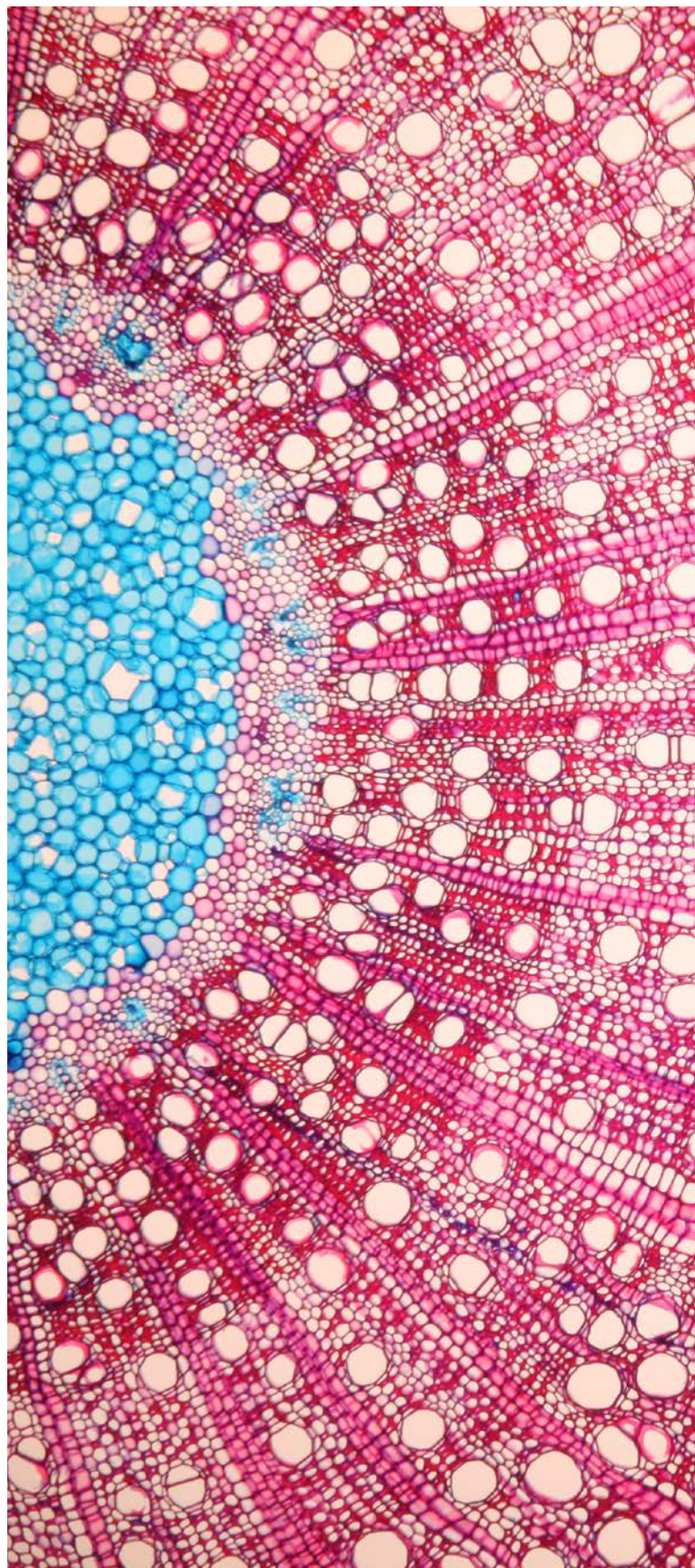
Les chercheurs ont cultivé des arbres tropicaux attachés à un tuteur incliné à 45 degrés. Après quelques mois, ils ont supprimé le tuteur. Les plantes se redressaient immédiatement. Cependant, chez certaines espèces, si on enlève leur écorce, ce retour à la verticale n'a pas lieu. L'écorce aurait donc un rôle crucial dans le contrôle de la posture de certains arbres.

Pour comprendre l'action de l'écorce, les chercheurs en ont étudié la structure. Les fibres y sont organisées en treillis, une sorte de réseau dont les mailles sont des losanges. Or, lorsque l'arbre s'incline (par exemple du fait de la présence d'une grosse branche d'un côté du tronc), une plus grande quantité de bois est produite du côté opposé au déséquilibre. À cet endroit, la circonférence de l'écorce augmente et le treillis est étiré latéralement. Les chercheurs suggèrent que, du fait de sa structure en losanges, le treillis engendre une force de traction verticale le long du tronc du côté où plus de bois a poussé. Cette asymétrie de forces verticales aide au redressement de l'arbre.

L'analyse de coupes réalisées sur des troncs d'arbres tels que le cacaoyer rivièr (Pachira aquatica) confirme ce mécanisme. Dans l'écorce (l'anneau périphérique bleu dans l'image ci-contre), les fibres du treillis sont organisées en flammes (en rouge) séparées par des cellules non lignifiées de parenchyme (en bleu). Dans le cas des arbres cultivés à 45 degrés, les flammes du côté supérieur du tronc sont très écartées les unes des autres par des cellules de parenchyme dilatées: le treillis est étiré, comme prévu. ■

DONOVAN THIEBAUD

B. Clair et al., *New Phytologist*, en ligne le 4 août 2018





© Bruno C. 317 | Laboratoire Ecotoc | CNRS/Agroparistech/Cirad/Inra/Univ. versité de Guyane/Univ. versité des Antilles

GÉOSCIENCES

DES SIMULATIONS POUR AVALANCHES DE PLAQUE

Ce type d'avalanche était particulièrement difficile à reproduire sur ordinateur. Grâce à un nouveau modèle, un chercheur l'a décrit avec une grande précision.

Souvent provoquées par le passage d'un seul skieur, les avalanches de plaque sont parmi les plus meurtrières. Prévoir leur déclenchement est d'une importance cruciale dans la prévention des risques en montagne, mais la tâche est difficile. En outre, la modélisation de ce phénomène sur ordinateur était jusque-là incomplète. Johan Gaume, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse, a développé un nouveau modèle mathématique pour décrire ces avalanches avec une précision sans précédent. Il a collaboré avec des spécialistes en modélisation 3D qui ont notamment simulé la neige dans le célèbre film d'animation de Disney, *La Reine des neiges*. Le résultat est fort réaliste.

Les avalanches de plaque se produisent dans un manteau neigeux particulier. Une couche de neige fragile, généralement très poreuse (constituée à 80% d'air), se forme au début de l'hiver à la base du manteau neigeux. Les chutes de neige suivantes enfouissent cette couche sous une plaque de neige plus dense. La configuration est instable. En bas d'une pente raide, un marcheur peut perturber la couche inférieure en créant une fissure, qui se propage très rapidement (jusqu'à 100 mètres par seconde) jusqu'en haut de la pente. La plaque finit par rompre là où l'angle de la pente dépasse l'angle limite de maintien de la plaque sur la couche poreuse. Elle se divise ensuite en plusieurs morceaux qui glissent sur la couche inférieure.

Il est difficile de prévoir ces avalanches par des mesures directes (température, pression, humidité, etc.). En général, les spécialistes savent repérer une couche poreuse, et donc un lieu à risque, mais ils ne sont pas en mesure d'estimer le volume de neige qui sera relâché par l'avalanche.

Pour répondre notamment à cette question, Johan Gaume et son équipe ont développé un modèle mathématique qui décrit les propriétés de la plaque et celle de la couche sous-jacente (notamment leur comportement élastoplastique). Leur simulation porte sur 30 millions de particules, qui représentent les grains de neige dans la plaque et la couche fragile. L'écoulement de l'avalanche est recréé



Sur cette image, l'arrière-plan est une photographie, mais le premier plan est un instantané d'une simulation tridimensionnelle d'avalanche de plaque.

100

KILOMÈTRES PAR HEURE

C'EST LA VITESSE QUE PEUVENT ATTEINDRE LES AVALANCHES DE PLAQUE.

ELLES SONT NÉANMOINS PLUS LENTES QUE LES AVALANCHES DITES POUDREUSES, DONT LES NUAGES DÉVALENT LA PENTE JUSQU'À 350 KILOMÈTRES PAR HEURE.

en calculant, pour chaque pas de temps, la position des particules. Une modélisation particulièrement complexe, car les avalanches de plaque se manifestent sur une large gamme d'échelles: leur déclenchement est dû à la présence de microfissures, de longueur inférieure à un millimètre, tandis que les fractures, collisions et frictions entre plaques finissent par donner, à l'échelle macroscopique, un écoulement assimilable à celui d'un fluide visqueux. Malgré ces difficultés, la simulation reproduit avec fidélité les observations.

Le modèle de Johan Gaume présente toutefois une limite de taille: il décrit fidèlement l'avalanche de plaque uniquement pour un déclenchement rapide (provoqué par un skieur ou une explosion). Le chercheur travaille sur un nouveau modèle qui inclura les déclenchements naturels plus lents. Il espère également prédire le volume de neige relâché en fonction de paramètres plus précis tels que la distribution spatiale du manteau neigeux, le type de neige (sèche, humide ou fondante), l'érosion de la neige en aval de la plaque ou le type de dépôt de la neige. ■

L. S.

J. Gaume et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 3047, 2018

BIOLOGIE

E. COLI POUR ASSIMILER LE FER

Si certaines souches de la bactérie *Escherichia coli* sont pathogènes, la plupart sont inoffensives. Et d'ailleurs, elles représentent l'une des principales populations bactériennes du système digestif humain. Cependant, on savait qu'*E. coli* produit une molécule, l'entérobactine, qui permet à la bactérie d'assimiler le fer. Les biologistes pensaient qu'*E. coli* captait ainsi le fer au détriment de son hôte. Mais Bin Qi et Min Han, de l'université du Colorado à Boulder, aux États-Unis, suggèrent le contraire: l'entérobactine produite par *E. coli* dans le système digestif s'associerait à une protéine dans les mitochondries des cellules de l'hôte... aidant ainsi ce dernier à assimiler le fer. Ce résultat pourrait inspirer des stratégies thérapeutiques pour les personnes souffrant d'anémie. ■

S. B.

Bin Qi et Min Han, *Cell*, en ligne le 23 août 2018

GÉOSCIENCES

VIE ANCIENNE ET CONTINENTALE

Gâce au registre fossile, on estime que la vie sur Terre serait apparue dans les océans il y a 3,8 à 4,3 milliards d'années. Plus récente, la conquête du milieu terrestre par les organismes vivants est pourtant bien moins documentée. Cependant, Martin Homann, du Laboratoire géosciences océan, à Brest, et ses collègues ont découvert des traces de vie microbienne fossilisée dans des roches sédimentaires continentales âgées de 3,2 milliards d'années. Retrouvées en mer au large de l'Afrique du Sud, ces roches se seraient formées dans un lit de rivière, avant d'être emportées.

Les chercheurs ont montré que les microorganismes étaient déjà adaptés au milieu terrestre, où la sécheresse épisodique pouvait déshydrater les cellules et où l'absence de couche d'ozone exposait les organismes à un rayonnement solaire très mutagène. Cette découverte montre que la conquête du milieu terrestre a été bien plus ancienne et rapide qu'on ne l'imaginait. ■

CORALINE MADEC

M. Homann et al., *Nature Geoscience*, vol. 11, pp. 665-671, 2018

PHYSIQUE

LE RESSAUT HYDRAULIQUE REVU ET CORRIGÉ



Dans l'évier, le jet d'eau forme une région très lisse cernée par un bourrelet turbulent. C'est le ressaut hydraulique.

Lorsque l'eau du robinet coule dans l'évier, vous avez peut-être remarqué cette nappe d'eau très mince et lisse autour du jet d'eau; à une distance de quelques centimètres du jet, cette nappe disparaît dans un bourrelet d'eau turbulente. Depuis un siècle, les physiciens pensaient que la position de ce «ressaut hydraulique» était déterminée principalement par la gravité. Cependant, Rajesh Bhagat, de l'université de Cambridge, et ses collègues viennent de montrer que le phénomène dépendrait plutôt de la tension de surface et de la viscosité de l'eau.

Jusqu'à présent, on négligeait ces deux caractéristiques du fluide et on raisonnait que le ressaut se formait là où la vitesse du fluide (qui diminue à mesure qu'il s'éloigne du jet) et la vitesse (constante) des ondes de surface, c'est-à-dire des vagues, sont égales. Or cette dernière, dans la configuration de l'évier, dépend de g , l'accélération de la pesanteur. C'est donc la pesanteur, pensait-on, qui déterminerait la position du ressaut.

Dans le cadre de sa thèse, Rajesh Bhagat étudiait le nettoyage de surfaces par des jets de fluide. Il était ainsi amené à travailler avec des surfaces horizontales, mais aussi inclinées, voire verticales. Dans ces derniers cas, la forme du ressaut restait inchangée par rapport à la configuration horizontale – un résultat surprenant et difficile à expliquer si la gravité joue un rôle important dans la position du ressaut. Avec ses collègues, Rajesh Bhagat a repris les équations qui décrivent le système du fluide dans l'évier, en tenant compte de la viscosité et de la tension de surface. Les équations obtenues montrent que ces facteurs sont dominants, et que la gravité joue un rôle négligeable. Ces physiciens ont testé expérimentalement leur modèle en faisant varier la viscosité du fluide, sa tension de surface et l'angle de la surface, et montré qu'il prédit correctement la position du ressaut. ■

S. B.

R. K. Bhagat et al., *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 851, R5, 2018

GÉNÉTIQUE

INVASION DE RÉTROVIRUS EN COURS DANS L'ADN DES KOALAS

Le suivi de cette intrusion récente révèle comment les rétrovirus ont envahi les génomes de vertébrés il y a des millions d'années.

Un rétrovirus a commencé à s'introduire dans le génome des koalas depuis «seulement» 50 000 ans. Il est rare de pouvoir observer en temps réel (à l'échelle de l'évolution...) le début de l'invasion du génome d'un hôte par un rétrovirus. Une équipe internationale dont fait partie Ulrike Löber, de l'institut Leibniz de recherche sur les animaux sauvages et de zoo, à Berlin, s'est penchée sur ce phénomène et a ainsi obtenu des informations sur le mécanisme par lequel les rétrovirus s'intègrent au génome tout en perdant leur pouvoir pathogène.

Un rétrovirus est un virus dont le génome est constitué d'ARN. Au cours du cycle viral, une enzyme, la transcriptase inverse, produit un ADN à partir de cet ARN. Les rétrovirus insèrent cet ADN dans celui de leur hôte, qui produit alors de nouvelles copies du virus. Généralement, ce sont les cellules somatiques qui sont infectées, auquel cas le rétrovirus n'est pas transmis à la descendance. Mais il arrive parfois que des cellules germinales de l'hôte soient infectées. Si l'hôte survit, le rétrovirus se transmet alors aux générations suivantes et l'on dit de lui qu'il est endogène.

Chez les vertébrés, une part non négligeable du génome est constituée d'éléments provenant de rétrovirus endogènes. «Ils correspondent à d'anciens rétrovirus qui sont devenus "défectifs", c'est-à-dire qui ont perdu leur capacité à ressortir de la cellule pour aller en infecter d'autres», explique Pascale Lesage, de l'Institut universitaire d'hématologie, à l'hôpital Saint-Louis, à Paris. Ainsi, l'architecture du génome des vertébrés reflète une longue histoire d'invasion de la lignée germinale par des rétrovirus infectieux. Cependant, la plupart des rétrovirus endogènes connus ont terminé l'invasion de la lignée germinale de leur hôte il y a des millions d'années. Il est donc difficile de savoir ce qui s'est passé au moment même de l'intrusion et comment les virus ont été rendus défectifs.

Le cas des koalas constitue une exception. Un rétrovirus nommé KoRV (impliqué dans le syndrome d'immunodéficience du koala, l'équivalent du sida chez l'homme) a commencé à envahir le génome germinale de ces marsupiaux il y a seulement 50 000 ans. Ulrike Löber et ses



Depuis 50 000 ans, le rétrovirus KoRV s'installe dans le génome des koalas. En recombinant son génome avec celui d'un autre rétrovirus déjà intégré, KoRV perd son caractère infectieux.

8 %

C'EST LA PART DU GÉNOME HUMAIN CONSTITUÉE D'ÉLÉMENTS ISSUS DE RÉTROVIRUS ENDOGÈNES. PAR EXEMPLE, HERV-K EST UNE FAMILLE DE RÉTROVIRUS ENDOGÈNES QUI A ÉTÉ INTÉGRÉE AU GÉNOME HUMAIN IL Y A AU MOINS 30 MILLIONS D'ANNÉES.

collègues ont analysé le génome de koalas de différentes régions de l'Australie (des koalas sauvages ou en captivité, ou des spécimens conservés dans des muséums). Les résultats montrent que tous les koalas ne sont pas encore infectés par KoRV. Chez ceux qui le sont, le rétrovirus n'est pas encore fixé dans une région particulière du génome. Autrement dit, l'invasion n'en est encore qu'à ses débuts.

Les chercheurs ont aussi montré qu'à la suite de son intrusion, le génome de KoRV se recombine avec celui d'un autre rétrovirus endogène des koalas, déjà défectif. Cette recombinaison élimine des séquences importantes de KoRV pour ses fonctions pathogènes et a pour conséquence de permettre sa fixation dans la lignée germinale du koala. «La possible recombinaison entre deux rétrovirus était déjà connue, mais l'idée intéressante de l'équipe est que cela pourrait être l'un des moyens par lequel le rétrovirus devient endogène», précise Pascale Lesage. Cela expliquerait en partie pourquoi la plupart des rétrovirus endogènes sont devenus défectifs dans le génome des vertébrés. ■

ALINE GERSTNER

U. Löber *et al.*, *PNAS*, vol. 115(34), pp. 8609-8614, 2018

DE LA GLACE D'EAU LUNAIRE CONFIRMÉE

En 2009, l'instrument M3, de la Nasa, à bord de la sonde Chandrayaan-1, de l'agence spatiale indienne, avait mis en évidence la présence d'eau sur la Lune. Shuai Li, de l'université d'Hawaii, et ses collègues ont réanalysé les données de M3. Ils ont montré que de la glace d'eau est présente dans le fond des cratères des régions polaires de la Lune. Ces cratères ne sont jamais éclairés par le Soleil et la température n'y dépasse pas - 150 °C.

UN PERROQUET QUI ROUGIT

Les perroquets ont de nombreuses expressions faciales, mais leur rôle n'a été que peu étudié. Aline Bertin, de l'Inra, et ses collègues ont observé des aras bleu et jaune (*Ara ararauna*) du zoo de Beauval. Les oiseaux dressent les plumes de la nuque ou du sommet du crâne plus souvent lorsque les soigneurs interagissent avec eux ou quand ils participent à certaines activités avec d'autres aras. Les chercheurs ont aussi montré que la peau des joues des aras rougissait parfois. Reste à comprendre le rôle de ces signaux.

STEVE N'EST PAS UNE AURORE

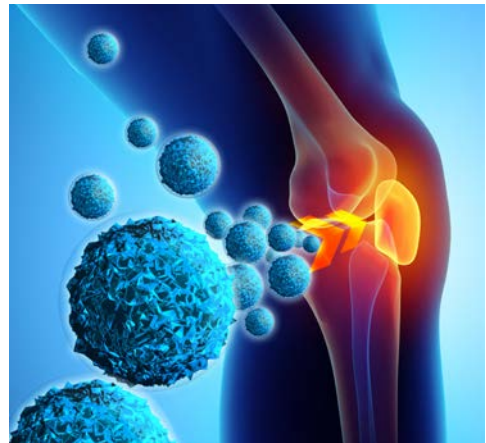
Le phénomène atmosphérique nommé Steve (*Strong thermal emission velocity enhancement*), observé initialement par des photographes amateurs, a d'abord été pris pour un type particulier d'aurore polaire. Mais ce fin ruban de lumière violet et blanc ne serait pas produit par une pluie de particules chargées dans la haute atmosphère, à l'instar des aurores. C'est ce qu'a conclu Bea Gallardo-Lacourt, de l'université de Calgary, au Canada. Elle a utilisé des observations satellitaires pour montrer l'absence de particules chargées pendant un Steve. Reste donc la question : qui est Steve ?

ESPOIR CONTRE L'ARTHROSE

En France, près de 65% des personnes de plus de 65 ans souffrent d'arthrose. Cette inflammation des articulations, due à une disparition du cartilage entre les os, est très douloureuse. Or il n'existe actuellement aucun traitement curatif pour cette pathologie invalidante.

Eric Allémann, de l'université de Genève, et ses collègues ont amélioré une piste utilisant un gel d'acide hyaluronique. Jusqu'à présent, le gel était injecté dans les articulations pour servir de lubrifiant, mais il était dégradé en quelques jours par l'organisme et perdait donc son efficacité. Les chercheurs ont modifié la structure du gel pour former des nanoparticules, qui agissent comme des roulements à billes dans les articulations. Chez la souris, ces nanoparticules protègent efficacement le cartilage pendant plusieurs mois.

Eric Allémann et ses collègues ont aussi étudié une piste thérapeutique reposant sur la kartogénine, un principe actif dont l'efficacité avait été démontrée lors d'essais précliniques en 2012. Ils ont conçu un traitement local pour le genou par injection de kartogénine. Pour obtenir un effet prolongé, les chercheurs ont encapsulé le composé sous forme de nanocristaux dans des microparticules de 10 micromètres de diamètre.



Des nanoparticules pourraient protéger le cartilage, voire le réparer, chez les patients souffrant d'arthrose.

Ces microparticules composées de polymères biodégradables restent dans le genou plusieurs mois et libèrent progressivement le principe actif. Les scientifiques ont non seulement constaté que le cartilage arrêtait de se dégrader, mais aussi qu'il augmentait d'épaisseur chez certains rongeurs. À terme, un traitement combinerait ces deux approches, avec des nanoparticules d'acide hyaluronique qui protégeraient le cartilage le temps que la kartogénine agisse et répare ce dernier. ■

CLAIRE HETTZ

P. Maudens *et al.*, *Small*, vol. 14(8), article 1703108, 2018 ;
P. Maudens *et al.*, *Nanoscale*, vol. 10(4), pp. 1845-1854, 2018

LE BLÉ TENDRE SE DÉVOILE

Le blé tendre, ou froment, représente la base de l'alimentation d'un tiers de la population mondiale. Après treize ans de travaux, le Consortium international de séquençage du génome du blé (IWGSC) a atteint l'objectif qu'il s'était fixé. La difficulté de l'analyse était à la mesure de la taille et de la complexité du génome, avec environ 15,5 milliards de paires de bases (le génome humain contient environ 3,2 milliards de paires de bases). Cela s'explique en partie par le fait que le blé est une plante polyploïde : il contient trois génomes. Ils ont été conservés lors du croisement de deux espèces entre elles d'abord, puis avec une troisième. Mais le séquençage a été aussi rendu difficile par le fait que plus de 85% du génome du blé est constitué de séquences répétées.



Le génome du blé tendre contient environ 15,5 milliards de paires de bases, cinq fois plus que chez l'humain.

Cette analyse précise la localisation de 107891 gènes et de plus de 4 millions de marqueurs moléculaires. Elle servira de point de départ pour identifier, chez cette plante d'un intérêt agronomique majeur, des gènes impliqués dans la qualité du grain, la résistance aux maladies ou la tolérance à la sécheresse, etc. ■

A. G.

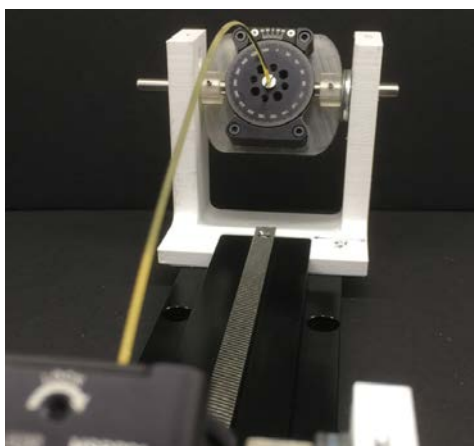
Consortium IWGSC, *Science*, vol. 361, articles eaar6089 et eaar7191, 2018

PHYSIQUE

BRISER EN DEUX LES SPAGHETTIS

Si l'on plie un spaghetti jusqu'à ce qu'il se casse, il se brisera en trois morceaux ou plus, jamais en deux; c'est le «mystère du spaghetti». Mais avec des collègues, Ronald Heisser et Vishal Patil, du MIT, aux États-Unis, ont découvert une astuce pour briser la pâte longiligne en deux morceaux.

Dans le cas classique, le spaghetti se casse d'abord en deux morceaux, qui sont parcourus par une onde, dite de détente de flexion. Cette onde contribue au redressement des tiges, mais passe par un régime transitoire qui augmente la flexion à certains endroits et brise à nouveau les tiges. Mais si la contrainte appliquée au spaghetti pour le briser est à la fois une flexion et une torsion, deux types d'ondes de détente se propagent dans les deux morceaux, l'une de flexion et l'autre de torsion. Or les ondes de détente de torsion se propagent très vite. La contrainte en torsion s'annule donc très rapidement, et celle en flexion est alors insuffisante à elle seule pour briser les deux morceaux de spaghetti.



Ce dispositif applique une torsion avant de plier les spaghettis. Cette astuce permet de les casser en deux.

Emmanuel Villermaux, de l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre, à Marseille, qui a participé à l'étude, souligne que ce résultat aura un grand intérêt dans l'étude des fibres optiques, des fibres de verre et des ouvrages d'art longilignes, comme les ponts. ■

D. T.

R. Heisser et al., *PNAS*, vol. 115(35), pp. 8665-8670, 2018

EN BREF

L'ATTENTION EST DISCONTINUE

Lorsqu'on fixe un point de l'espace, notre attention semble continue. Mais cette continuité est une illusion. Sabine Kastner, de l'université Princeton, et ses collègues ont montré que notre attention fluctue de façon inconsciente et régulière, quatre fois par seconde. Ainsi, le cerveau alterne entre l'objet de notre attention et ce qui se passe autour. Les chercheurs ont aussi montré que ce comportement et sa régularité sont liés à un rythme cérébral (des ondes de faible amplitude produites par l'activité neuronale) qui agit sur deux zones du réseau frontopariétal. Présent chez l'homme et le macaque, ce trait est un avantage évolutif certain pour ne pas être surpris par un prédateur.

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

FILMS / DANS LE CADRE DE LA FÊTE DE LA SCIENCE

Samedi 13 octobre – 15h : L'esprit des lieux
Réal. : Stéphane Manchegatin et Serge Steyer (France – 2018 – 91')
En présence de Marc Namblard, audio-naturaliste

Dimanche 14 octobre – 15h : Langue des oiseaux (causerie)
Une proposition d'Erik Bullo (théoricien du cinéma, professeur à l'École nationale supérieure d'art de Bourges, cinéaste).
Projection du film *Nouveau Manuel de l'oiseleur* d'Erik Bullo (France – 2017 – 12') et performance de Violaine Lochu, U-ululer. En présence d'Erik Bullo, accompagné de Michel Kreutzer (professeur émérite d'éthologie à l'université Paris Nanterre) et Frédéric Jiguet (ornithologue et biologiste de la conservation français, professeur au MNHN)

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

BAR DES SCIENCES

Dimanche 14 octobre – 17h30 : Santé environnementale : comment sommes-nous exposés aux perturbateurs endocriniens ?
Débat animé par Marie-Odile Monchicourt, journaliste
Robert Barouki, docteur en médecine, toxicologue, Université Paris Descartes
André Cicoella, président de l'association Réseau Environnement Santé
Barbara Demeneix, spécialiste des régulations endocriniennes, professeur au Muséum pour soigner les résidents de la Galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée.

Café Les Belles Plantes – 47 rue Cuvier, Paris 5^e

© R. Heisser et al. / MIT

DES SÉISMES PLUS LOIN QUE PRÉVU

La géothermie et la fracturation hydraulique reposent sur des puits dans lesquels un fluide sous haute pression est injecté. Les géologues pensaient que ces systèmes induisaient des séismes seulement si la roche en profondeur était de nature cristalline, c'est-à-dire rigide et cassante. Et on observait effectivement des séismes jusqu'à 1 kilomètre de distance autour des puits. Mais qu'en est-il des sols sédimentaires? Thomas Goebel et Emily Brodsky, de l'université de Californie à Santa Cruz, ont montré que les sites à roches sédimentaires seraient propices à des séismes, et cela jusqu'à 10 kilomètres du puits d'injection. Le mécanisme de déclenchement de ces séismes serait de nature différente de celui à l'œuvre dans les roches cristallines. Il serait lié à des changements de propriétés élastiques des roches sous l'effet de la pression. ■

LAMBERT BARAUT-GUINÉ

T. H. Goebel et E. E. Brodsky, *Science*, vol. 361, pp. 899-904, 2018

LA PLUS ANCIENNE TORTUE À BEC



Vieux de 230 millions d'années, ce fossile est celui d'une tortue semi-carapacée, dotée de dents en voie de raréfaction à l'arrière d'une mâchoire prolongée par une excroissance de peau durcie : un bec.

LE GÉOCROISEUR ITOKAWA DATÉ

Lancée en 2003, la sonde japonaise Hayabusa est revenue sur Terre sept ans plus tard en transportant des poussières collectées sur l'astéroïde Itokawa. Ce corps appartient à la famille des géocroiseurs, dont l'orbite croise périodiquement celle de la Terre. Or l'origine de ces astéroïdes est mal connue. Kentaro Terada, de l'université d'Osaka, et ses collègues ont étudié les 1500 particules collectées par la sonde Hayabusa, et plus précisément les quelques fragments de roche phosphatée. Grâce à un spectromètre de masse, ils ont mesuré les proportions de différents isotopes d'uranium et de plomb (sous-produit de la désintégration de l'uranium). Ils ont ainsi daté la formation de ces roches phosphatées. Les chercheurs ont conclu que le corps parent d'Itokawa s'est formé il y a 4,6 milliards d'années, à la naissance du Système solaire, et qu'il aurait subi un impact destructeur il y a 1,5 milliard d'années, qui a donné forme à Itokawa. ■

L. S.

K. Terada et al., *Scientific Reports*, vol. 8, article 11806, 2018

Le débat sur la façon dont les tortues sont affiliées aux reptiles est depuis longtemps... tortueux. Avec des collègues chinois, canadiens et britanniques, Xiao-Chun Wu, du musée canadien de la Nature, à Ottawa, a découvert en Chine un fossile de tortue datant de 230 millions d'années. La trouvaille fait avancer ce débat et en même temps le trouble.

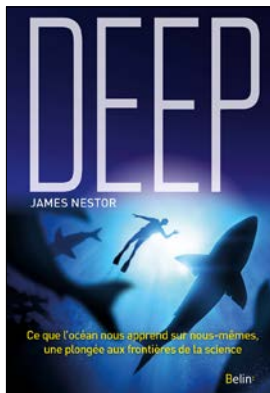
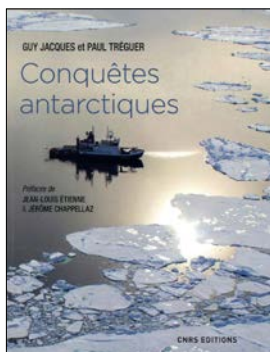
En 2015, la discussion avait bien progressé avec la découverte, en Allemagne, de *Pappochelys rosinae* («tortue grand père»). Vieille de 240 millions d'années, cette tortue sans bec présentait un blindage ventral semi-rigide, des côtes élargies, des dents et, surtout, un crâne à deux fenêtres temporales, comme tous les reptiles (qui sont pour cette raison des «diapsides»). Cette constatation poussait à rapprocher *Pappochelys* d'*Eumotosaurus*, un reptile vieux de 260 millions d'années à forme de lézard, mais faisant penser aux tortues; du reste, des microARN communs invitaient aussi à lier les tortues aux lézards. Avec *Pappochelys*, la discussion avait d'autant plus avancé qu'en 2008, la découverte d'*Odontochelys semitestacea* («tortue à dents semi-carapacée»), une tortue de 220 millions d'années dotée d'un blindage ventral rigide, de côtes aplaties, sans bec, avec des dents et un crâne massif sans fenêtres temporales, esquissait une trajectoire évolutive.

Or *Eorhynchochelys sinensis*, la tortue mise au jour par l'équipe de Xiao-Chun Wu, confirme cette trajectoire évolutive pour le corps, mais pas pour le bec! Située par son âge de 230 millions d'années entre *Pappochelys* et *Odontochelys*, elle avait en effet le même corps que *Pappochelys*, mais un bec (et aussi des dents de fond).

Pour Rainer Schoch, le découvreur de *Pappochelys*, malgré ce détail, *Eorhynchochelys* ne fait que confirmer la trajectoire évolutive esquissée. Pas pour Xiao-Chun Wu; après avoir comparé les traits des tortues en incluant *Eorhynchochelys*, il affirme qu'on ne peut à ce stade relier ces animaux ni aux lézards, ni aux dinosaures, ni aux oiseaux, ni aux crocodiliens; les tortues seraient plutôt «une ramification d'ancêtres plus anciens». En d'autres termes, le débat se poursuit. ■

F. S.

Chun Li et al., *Nature*, vol. 560, pp. 476-479, 2018



CLIMATOLOGIE

CONQUÊTES ANTARCTIQUES

Guy Jacques et Paul Tréguer

CNRS Éditions, 2018

238 pages, 24 euros

L'Antarctique «est le continent de tous les extrêmes: le plus froid, le plus aride, le plus venteux».

Tous deux océanographes, les auteurs de ce livre ont élargi leur propos pour traiter non seulement de l'océan Austral mais de plusieurs avancées scientifiques qui ont eu pour cadre ce monde lointain: son exploration, celle des îles et de l'océan circulaire qui le bordent, l'apport des forages glaciaires à l'histoire du climat, la compréhension d'un écosystème marin unique, les adaptations surprenantes découvertes chez les manchots, la vie jusqu'alors ignorée sous la glace marine. Les chapitres sur le krill et le rôle de l'océan Austral comme important puits de carbone pour l'atmosphère sont les plus pointus, puisque le premier auteur était directeur de recherche au CNRS à la station de Banyuls et biologiste spécialiste du plancton, le second professeur à l'université de Brest et océanographe chimiste.

En lisant ce livre de vulgarisation scientifique qui passe en revue plusieurs disciplines, on prend conscience que notre pays a trouvé dans ce cadre original l'occasion de se placer au plus haut niveau international sur plusieurs thèmes de recherche. Faut-il rappeler que l'analyse des gaz emprisonnés dans les glaces pendant 800 000 ans a permis de prouver que l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz carbonique due aux activités humaines a joué un rôle majeur dans le rythme de la dernière déglaciation? Combien de protecteurs de l'environnement savent que notre pays a entraîné les autres pour obtenir que le continent antarctique soit soustrait – jusqu'en 2048 au moins – à l'exploitation de ses ressources minérales et déclaré «Terre de paix et de science»?

PIERRE JOUVENTIN

ÉCOLOGUE ÉMÉRITE AU CNRS

Océanographie

DEEP

James Nestor

Belin, 2018

336 pages, 23 euros

Le titre est explicite: l'auteur nous révèle par quelles méditations

et autres introspections certains plongeurs d'exception pratiquent l'apnée à des profondeurs de plus en plus grandes. Mais il n'y a pas que cela. Au fil des pages, il tient le lecteur en haleine en lui faisant découvrir les mystères des océans, avec, en toile de fond, des récits de descente toujours plus téméraires.

Pour autant, il met d'emblée

en garde en n'épargnant pas au lecteur de dures descriptions d'accidents de plongée. Elles montrent à quel point l'apnée est un sport dangereux, qui exige une intense préparation physique et mentale. Et c'est là que l'auteur, en observant en particulier les Amas japonaises, ces femmes qui, depuis la nuit des temps, plongent pour remonter leur menu du jour, sait donner les conseils qui vous aideront, si vous le souhaitez, à devenir un apnéiste «qui remonte avec le sourire aux lèvres».

On comprend vite que le but

recherché est de surmonter les difficultés pour acquérir une autonomie et s'inscrire «utilement» dans une belle démarche de compréhension des espèces les plus spectaculaires peuplant les océans. Aborder autrement le problème des requins tueurs de la Réunion, comprendre leur comportement, éduquer la population locale et aider à prendre les décisions après marquages et suivis, participe de ces actions justifiant l'engagement des sportifs. La même démarche prend une autre dimension avec les dauphins et les cachalots, car ces animaux vivent en société et échangent des signaux sonores qui sont, pour l'auteur, un véritable langage.

Si l'on ajoute l'histoire des grandes découvertes, celle de la pêche toujours plus destructrice, les tâtonnements par lesquels l'océanographie a montré l'omniprésence de la vie, etc., on a là un livre insolite, un peu déroutant, mais dont l'intérêt n'échappera à aucun lecteur.

JACQUELINE GOY

INSTITUT Océanographique, MONACO

MÉDECINE

L'ESPOIR D'UNE VIE LONGUE ET BONNE

Bernard Sablonnière

Odile Jacob, 2018

208 pages, 21,90 euros

Vivre 100 ans et plus? Peut-on (doit-on) encore repousser les limites du vieillissement? Certes, les centenaires sont de plus en plus nombreux, mais est-ce un but en soi quand on sait l'importance de la déchéance physique et mentale qui accompagne le plus souvent cette longévité? En revanche, mieux vieillir en bonne santé est un enjeu sociétal essentiel pour le futur. C'est là l'objectif que nous propose l'auteur, professeur de biologie moléculaire à l'université de Lille 2.

À partir des mécanismes connus du vieillissement cellulaire et des données de la génétique, il fait l'inventaire des outils que la recherche médicale met déjà et mettra plus encore à notre disposition dans les années à venir pour lutter contre le vieillissement: rôle préventif de l'alimentation, de l'activité physique et intellectuelle ainsi que de l'environnement, fonctions réparatrices des cellules-souches pluripotentes induites, modifications du patrimoine génétique et des mécanismes épigénétiques, greffes d'organes 3D à la base de la médecine régénérative, préfigurant l'homme bionique.

Ces promesses de la science

sont-elles des espoirs légitimes ou une boîte de Pandore? Si elles ouvrent la voie à de réelles améliorations des conditions de vie dans le grand âge, elles alimentent également des courants de pensée et des expériences de transhumanisme, dont l'objectif est d'accéder – à coups de milliards – à l'immortalité. Mais cette utopie d'éternité ne doit pas nous détourner de l'objectif essentiel: vieillir, pourquoi pas? Mais bien vieillir!

BERNARD SCHMITT

CERNH, LORIENT

BOTANIQUE

LE MESSIE DES PLANTES

Carlos Magdalena

Fayard, 2018

304 pages, 20,90 euros

Ce livre est un voyage fascinant dans le monde de la diversité végétale. Contrairement à tant d'ouvrages actuels, on n'y trouve aucune vision anthropisée du fonctionnement des plantes, et c'est un soulagement!

L'auteur rappelle en revanche que

nous avons besoin des plantes pour respirer, se nourrir, se soigner, s'habiller, construire des lieux de vie et que toute espèce végétale doit être préservée. Passionné depuis tout petit par la nature, Carlos Magdalena est devenu botaniste aux jardins royaux de Kew, près de Londres. Le récit de son parcours, depuis son enfance dans les Asturies, en Espagne, jusqu'à ce métier scientifique et naturaliste force l'admiration.

Il nous raconte aussi ses missions liées à la conservation et la reproduction des plantes menacées de disparition. Elles se déroulent dans les serres de Kew, dans l'archipel des Mascareignes, en Bolivie, au Pérou, en Australie. Le lecteur y lit des histoires de boutures, de fleurs, de pollinisation par des scarabées, de graines mais aussi de formation des populations locales aux techniques de propagation. Oui, c'est le terme, Carlos Magdalena fait de la propagation de plantes! Et les noms latins des espèces concernées sont nombreux! Il nous parle ainsi de *Ramosmania rodriguesii*, le café marron de l'île Rodrigues, dans l'océan Indien, et de différents nénuphars, dont *Victoria amazonica*, qui pousse dans le bassin amazonien, et *Nymphaea thermarum*, le plus petit du monde. Des planches photographiques au centre du livre montrent certaines espèces évoquées ainsi que l'auteur en mission.

Une fois le livre refermé, on est convaincu de continuer à s'émerveiller devant toute plante.

RÉGINE TOUFFAIT

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS

ET AUSSI



L'AUDACE DE SAPIENS

Marcel Otte

Odile Jacob, 2018

272 pages, 23 euros

Selon l'auteur, préhistorien, l'histoire évolutive singulière d'*Homo sapiens* s'explique par « l'action de sa pensée », par son « audace ». Passant en revue les principaux aspects de ce qui a fait *H. sapiens*, de l'homínisation, il s'efforce de montrer comment l'audace de nos ancêtres nous a valu nos outils, notre alimentation, nos habitats, notre socialité et nos rituels... Intéressant, le propos témoigne de l'immense culture anthropologique de l'auteur, mais sa thèse n'en est pas moins... audacieuse, car si l'audace a fait l'homme, qui a fait l'audace?

LES SPERMATOZOÏDES TOURNENT TOUJOURS À DROITE

Nathan Lents

Larousse, 2018

320 pages, 18,95 euros

Voilà l'exact opposé des nombreux ouvrages écrits pour chanter les beautés de notre merveilleux corps : il est consacré à ses défauts ! Vous rendez-vous compte que les os de notre poignet sont très nombreux, voire trop dans une articulation ? Savez-vous que nous devenons facilement obèses surtout parce que nos ancêtres ont été sélectionnés par la famine ? Que notre cerveau est génétiquement enclin à croire aux illusions ? Chaque défaut est abordé sous l'angle de la logique évolutive l'ayant produit ; et chaque cas évoqué est amusant.

LES UTOPIES DU XXI^e SIÈCLE

Libero Zuppiroli

Éditions d'En Bas, 2018

208 pages, 14 euros

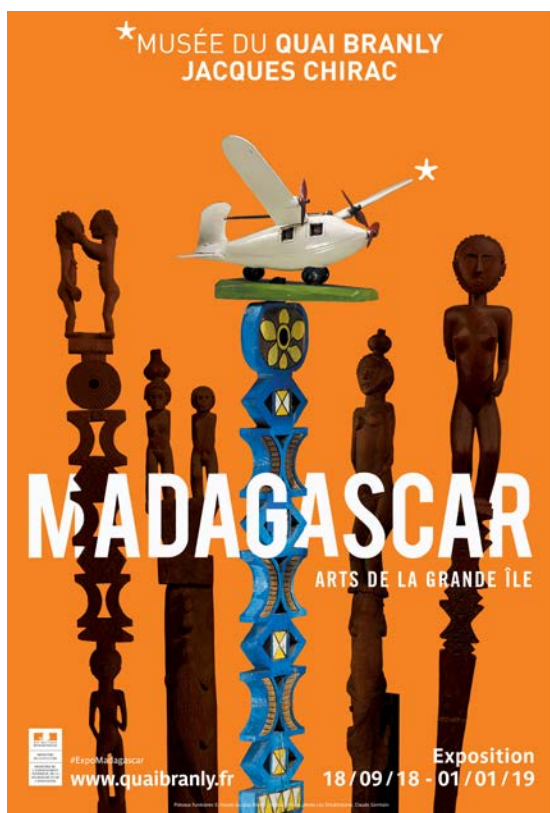
Sans cesse, de nouveaux récits utopiques se préparent, qui font oublier les anciens... L'auteur, physicien, évoque d'abord quelques grandes utopies du passé afin de nous rendre capables d'en comparer les promesses ridicules avec celles des utopies d'aujourd'hui : humanité connectée, numérisation universelle, ville intelligente, santé parfaite, rupture et changement permanent... Le résultat est édifiant et la synthèse ainsi que les propositions qui suivent sont plus qu'intéressantes.

PARIS

JUSQU'AU 1^{er} JANVIER 2019

Musée du Quai Branly
www.quaibrantly.fr

Les arts de la grande île de Madagascar



Bien que les premières traces d'occupation humaine à Madagascar remontent à 3000-4000 ans, cette grande île n'a été vraiment peuplée qu'à partir du V^e siècle, avec l'arrivée de populations austronésiennes, puis africaines. S'y sont ajoutés des marchands arabomusulmans, puis les colonisateurs européens. Carrefour d'influences diverses, Madagascar a développé une culture d'une grande originalité, dont témoignent les quelque 360 œuvres présentées dans cette exposition.

Au-delà de leur valeur artistique, ces œuvres, anciennes ou actuelles, produites par des artisans ou par des artistes, traduisent les croyances et l'imaginaire des populations malgaches, ainsi que leur mode de vie et leur histoire. Une partie des objets (sculptures en bois, vannerie, bijoux, armes, etc.) raconte le quotidien, tandis que les autres, tels les châles rituels et les remarquables poteaux funéraires, racontent le rapport des Malgaches au sacré, à la mort et à leurs ancêtres, dont le culte occupe une grande place. ■

MONTBÉLIARD

JUSQU'AU 3 MARS 2019

Le Pavillon des sciences
www.pavillon-sciences.com

L'œil nu



De l'anatomie de l'œil à son fonctionnement, cette exposition à la portée des jeunes âgés de plus de 7 ans explique les ressorts de la vision humaine et certains éléments d'optique. Avec des objets, des textes et des illustrations, et surtout de nombreuses démonstrations et manipulations, qui donnent à la visite un caractère ludique. ■

FRANCE MÉTROPOLITAINE

DU 6 AU 14 OCTOBRE

Nombreux lieux (2 500)
www.fetedelascience.fr

Fête de la science



Visiter un laboratoire, participer à un atelier de science, assister à des conférences ou à des débats, discuter avec des chercheurs et découvrir leur métier... Tout cela est facile lors de cette manifestation annuelle qui, cette année, compte quelque 6000 événements gratuits. Pour l'outre-mer, ce rendez-vous aura lieu du 10 au 18 novembre. ■

ET AUSSI

Mardi 2 et 9 octobre
Quai des Savoirs, Toulouse
www.quaidessavoirs.fr

TRANSPORTS DU FUTUR

Deux cafés-débats sur l'avenir des transports avec des spécialistes. Le premier porte sur le rôle de l'expérimentation, le second est autour de l'acceptation des innovations par la société.

Mardi 9 octobre, 18 h
Université Savoie-Mont-Blanc, Chambéry
www.univ-smb.fr/amphis

COMMUNICATION DES PLANTES

Geneviève Chapusio, de l'université de Franche-Comté, explique ce que l'on sait du langage chimique grâce auquel les plantes communiquent avec leur environnement. Également à d'autres dates dans d'autres lieux, notamment le 11 octobre à Annecy.

Jeudi 11 octobre
La Patio, université de Strasbourg
jardin-sciences.unistra.fr
AUX DÉBUTS DE LA VIE

Une conférence d'Abderrazak El Albani, de l'université de Poitiers, découvreur de fossiles dans des sédiments du Gabon vieux de 2,1 milliards d'années. Des fossiles qui ont bouleversé l'histoire de la vie pluricellulaire.

Du 26 au 31 octobre
MNHN et IPGP, Paris
www.pariscience.fr

PARISCIENCE

Quatorzième édition d'un festival de cinéma qui permet de voir gratuitement une sélection de films traitant de science et de problématiques connexes. Le thème choisi cette année est « science et pouvoir ».

Jusqu'au 4 novembre
MNHN, Paris
www.mnhn.fr

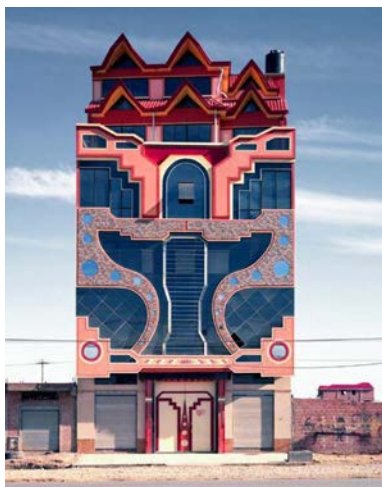
UN T. REX À PARIS

Les retardataires ont de la chance : cette exposition d'un remarquable squelette de *Tyrannosaurus rex* a été prolongée (voir *Pour la Science* de juin 2018).

PARIS

DU 14 OCTOBRE 2018 AU 24 FÉVRIER 2019
Fondation Cartier pour l'art contemporain
www.fondationcartier.com

Géométries Sud



Ces géométries du Sud n'ont vraiment rien à voir avec la géométrie tropicale dont il est question ailleurs dans ce numéro. Mais l'abstraction géométrique est bien présente dans les plus de 220 œuvres présentées. Celles-ci montrent la richesse et la variété des motifs et de leurs couleurs dans l'art latino-américain, de la période précolombienne jusqu'à nos jours. Artisanat, architecture, peintures corporelles, toiles d'artistes, photographies... un festival de motifs géométriques où se dessinent des traditions et des cultures des peuples sud-américains, parfois revisités par des artistes contemporains. ■

BLOIS

DU 10 AU 14 OCTOBRE
Plusieurs lieux à Blois et dans les environs
www.rdv-histoire.com

Rendez-vous de l'histoire

Bien sûr, les passionnés d'histoire sont les premiers concernés par ce grand rendez-vous annuel dont c'est la 21^e édition. Mais ceux qui s'intéressent à d'autres domaines ne sont pas en reste, car l'histoire touche aussi à l'archéologie, à la politique, à l'économie, à la sociologie et à d'autres sciences, d'autant que le thème de cette année est la «puissance des images».

Les festivaliers d'inclination scientifique pourront par exemple assister à une table ronde sur la capacité de l'image à fournir des preuves à l'ère numérique, à une autre sur les



inégalités environnementales, à un grand entretien sur «le nouvel âge de l'humanité» avec le paléanthropologue Pascal Picq, à une conférence de l'académicienne et physicienne Catherine Bréchnignac sur les images qui nous donnent accès à l'invisible, ou de Didier Roux, lui aussi académicien et physicien, qui parlera de l'influence des images sur la science et réciproquement... ■

VAULX-EN-VELIN

JUSQU'AU 11 AOÛT 2019
Planétarium de Vaulx-en-Velin
www.planetariummv.com



La Terre vue de l'espace

Les satellites d'observation de la Terre sont devenus indispensables à ceux qui s'inquiètent du devenir de la planète et de la gestion de ses ressources. Les images qu'ils fournissent de la surface du globe témoignent des changements dus aux activités humaines et montrent ainsi la vulnérabilité de la Terre. Mais les images présentées ne font pas que pointer des évolutions préoccupantes, elles montrent aussi la beauté et la diversité époustouflantes des paysages terrestres, au moins vus d'en haut. ■

SORTIES DE TERRAIN

Jeudi 4 octobre, 10 h
Guillaumes
(Alpes-Maritimes)
Tél. 04 42 20 03 83

GORGES DE DALUIS

Deux heures de balade facile dans cette réserve naturelle régionale, surnommée parfois le Colorado niçois, qui présente un grand intérêt géologique, ainsi qu'une flore et une faune remarquables.

Mardi 9 octobre, 19 h
Piste du lac des Escarcets
(83340, Var)
Tél. 04 42 20 03 83

CHASSE AUX PAPILLONS... PHOTOGRAPHIQUE

Non loin des bois bordant l'Aille, rivière qui traverse la réserve de la plaine des Maures, les organisateurs installeront des lumières attractives pour les papillons de nuit. Dont aucun ne sera capturé : seules les photographies serviront à les identifier !

Jeudi 18 octobre
Haute-Jarrie
et Champagnier (Isère)
Tél. 04 76 42 98 13

CHOUETTE BALADE

De 17 h 30 à 22 h, une promenade vespérale dans la nature, entre champs et forêts. Pour repérer et identifier ses habitants, le sens de la vision passera le relais à celui de l'audition.

Dimanche 21 octobre
Fontenay-les-Briis
(Essonne)
Tél. 01 60 91 97 34

CHAMPIGNONS DES SOUS-BOIS

Une après-midi d'initiation à l'identification des champignons, abondants en cette saison, avec l'Association mycologique buxéenne.

Lundi 22 octobre, 9 h
Saint-Michel-en-Brenne
(Indre)
Tél. 02 54 28 12 13

OISEAUX DE LA BRENNÉ

Une excursion de deux heures et demie, d'un étang à l'autre, à la rencontre des richesses ornithologiques de cette région réputée.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

« INTELLIGENCE ARTIFICIELLE », UNE EXPRESSION IMPROPRE

Si cette locution désigne un domaine en plein essor, elle fait aussi obstacle à la compréhension de ses enjeux.

Dans la construction du discours scientifique, le choix des mots est essentiel et l'abandon des mots « *impetus* », « phlogistique », « éther », etc. a successivement transformé la mécanique, la thermodynamique, l'optique, etc. Nous pouvons nous demander s'il ne serait pas sage de réserver le même sort à l'expression « intelligence artificielle », utilisée aujourd'hui pour désigner les algorithmes d'apprentissage automatique. Plusieurs griefs peuvent en effet être retenus contre elle.

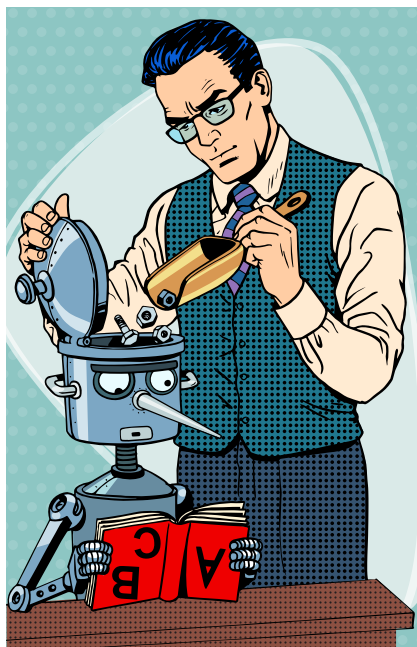
Tout d'abord, il est inhabituel, dans nos langues, de désigner un objet artificiel par un mot désignant un objet naturel suivi de l'adjectif « artificiel ». Nous disons « sous-marin », et non « poisson artificiel », « avion » et non « oiseau artificiel » (même si « oiseau » et « avion » partagent une même étymologie), « couteau » et non « dent artificielle ». Par la création de ces mots, nous rappelons qu'un couteau est autre chose qu'une dent fabriquée par un ingénieur: le couteau et la dent partagent certes certaines propriétés, telle celle de couper la viande, mais pas toutes.

Un autre inconvénient est que l'expression « intelligence artificielle » a changé de signification plusieurs fois au cours de sa brève histoire. Si « une intelligence artificielle » désigne aujourd'hui un algorithme d'apprentissage automatique et « l'intelligence artificielle » la branche de l'informatique qui étudie ces algorithmes, cette formule a, par le passé, désigné d'autres branches de l'informatique, telles que le traitement des langues ou la démonstration automatique

– raisonner, parler, apprendre ayant été, tour à tour, les facultés de l'intelligence mises en avant.

Par ailleurs, cette expression nous laisse croire que la finalité d'un objet

Cette expression relève
d'une tradition fantastique
ancienne, à l'image
de Geppetto et Pinocchio



Voir l'« intelligence artificielle » comme une version moderne de *Pinocchio* limite les enjeux du domaine à des questions anthropocentrées.

technique est d'imiter une faculté humaine, alors que nous construisons, au contraire, ces objets techniques pour dépasser nos handicaps. Nous ne cherchons pas à construire des calculatrices qui font des multiplications comme nous ou des véhicules autonomes qui conduisent comme nous. C'est plutôt parce que nous ne savons pas faire de multiplications sans erreurs ou conduire de véhicules sans provoquer d'accidents que nous construisons ces objets.

Mais, surtout, « intelligence artificielle » relève d'une tradition fantastique ancienne qui, de Pygmalion et Galatée, Frankenstein et sa créature, Loew et le Golem, jusqu'à Geppetto et Pinocchio, met en scène la fabrication d'êtres humains sans recours à la reproduction sexuée. À travers la question éthique: faut-il donner les mêmes droits à Pinocchio qu'à un autre être humain?, cette tradition s'interroge sur la frontière qui sépare le vivant de l'inerte et l'humain du non-humain, sur notre anthropocentrisme et sur l'anthropomorphisme qui consiste à éprouver des sentiments pour un ours en peluche.

Or un algorithme d'apprentissage automatique n'est pas un pantin de bois devenu soudainement humain et, pour importantes qu'elles soient, ces questions éthiques et philosophiques sont tout à fait différentes de celles posées par ces algorithmes. Se demander s'il est souhaitable de laisser un tel algorithme analyser une radiographie d'un patient et si débrancher un tel algorithme est un meurtre sont des questions toutes deux intéressantes, mais relativement indépendantes. Et il est dommage de voir la seconde convoquer nos fantasmes et nos peurs et nous empêcher de penser sereinement la première.

Il serait regrettable que l'expression « intelligence artificielle », qui a contribué à populariser les algorithmes d'apprentissage automatique, finisse par en masquer la nature et les enjeux. ■

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



en toutes intelligences

conférences - accès gratuit

septembre 2018
— janvier 2019

A la cité des sciences et de l'industrie

Grâce aux algorithmes, aux données de masse et aux puissances de calcul, l'intelligence artificielle imprègne déjà notre vie quotidienne et change nos habitudes. Elle permet de « survivre à la mort », de nous orienter vers la « bonne » filière étudiante ou le « bon » emploi, de mieux détecter certains cancers.

cité
sciences
et industrie



l'intelligence artificielle dans nos vies

cycle de conférences

jeudi 13 septembre,
4, 18 octobre
— 19h



recherche de vie : de nos origines à l'Univers

conférences

mercredi 10 octobre
— 19h

Au Palais de la découverte

Comment se forment les planètes et les étoiles, à l'origine de notre existence ? D'où viennent les molécules organiques essentielles à la vie ? Existe-t-il d'autres formes de vie dans l'Univers ?

Avec l'astrophysicienne
Anne-Marie Lagrange, lauréate
du prix Jean Ricard 2017.





LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

LE RAISONNEMENT QUI SAUVA LE MONDE

Il y a 35 ans, alarmé par un système de détection de missiles, un officier soviétique prit la décision adéquate. Par raisonnement contraposé plutôt que par intuition.



Le 26 septembre dernier, nous aurions pu célébrer le 35^e anniversaire du jour où le monde faillit basculer dans le chaos d'une guerre nucléaire, ou plutôt le 35^e anniversaire d'une décision qui a sauvé le monde. Il faut se replacer dans le contexte: nous sommes en 1983 et la guerre froide fait encore rage. Depuis que l'URSS a maîtrisé la technologie des armes nucléaires, le bloc soviétique et le bloc lié aux États-Unis sont entrés dans l'escalade de la peur, et l'on craint qu'une décision malheureuse ou un malentendu engendre un enchaînement létal pour l'humanité.

Cette rentrée de 1983 est particulièrement tendue: le 1^{er} septembre, un Boeing de la compagnie Korean Air reliant New York à Séoul est abattu par un avion de chasse soviétique. L'appareil a en effet dévié de sa route et est entré dans l'espace aérien soviétique. Le drame fait 269 morts, dont Larry McDonald, un membre très anticomuniste de la Chambre des représentants des États-Unis.

Stanislav Petrov, lieutenant-colonel des forces aériennes soviétiques, a sans

doute cette crise en tête lorsque, à peine vingt jours plus tard, en poste dans son bunker du village de Kourilovo, non loin de Moscou, il assume sa tâche de surveillance des alertes par satellites. Un peu après minuit, le système lui signale la détection de cinq missiles balistiques américains en direction de l'Union soviétique.

C'est une inférence solide qui permet à Stanislav Petrov de prendre la bonne décision

Que fallait-il faire? Des années après cet épisode méconnu, Petrov (décédé en 2017) a déclaré à un journaliste de la BBC avoir ressenti une «drôle de sensation au ventre» et s'être fié à son «intuition». Plutôt que de signaler à ses supérieurs l'attaque américaine, il paria sur une erreur du système, et la hiérarchie

militaire se fia heureusement à son jugement. La suite a montré que les satellites avaient confondu les reflets du Soleil sur les nuages avec des missiles balistiques.

Mais s'agissait-il vraiment pour Petrov d'une simple «intuition»? Probablement pas. Il n'eut que quelques instants pour suivre le bon raisonnement, mais c'est bien une inférence solide qui lui permit de prendre la bonne décision. En effet, expliqua-t-il, seuls cinq missiles américains avaient été détectés. Cela n'était pas conforme avec le scénario attendu d'une guerre nucléaire déclarée unilatéralement: si les États-Unis avaient attaqué l'URSS, ils l'auraient fait massivement. Cette inférence s'avéra exacte.

En logique, c'est ce que l'on nomme un raisonnement contraposé. La contraposition consiste à déduire, de la constatation «Si A, alors B», que «Si non-B, alors non-A». Ainsi, de «Si les États-Unis déclenchent une guerre nucléaire (A), alors ils le feront par un bombardement massif (B)», Petrov conclut: «Il n'y a que cinq missiles (non-B), donc les États-Unis ne nous attaquent pas (non-A)».

On pourrait ajouter que ce raisonnement contraposé fut soutenu par la puissance de l'heuristique, qui nous conduit à avoir plus de considérations pour les conséquences de nos actions que pour celles de notre inaction. Car il faut bien le reconnaître, le fait de gloire de Petrov a surtout consisté à ne rien faire et à prendre le risque d'avoir à assumer les conséquences de son inaction.

N'importe qui d'autre aurait-il eu la même réaction, les mêmes pressentiments rationnels? Ce n'est pas sûr. Contrairement à ses collègues, Petrov n'avait pas été formé dans une école militaire, mais dans le civil; cela l'aida peut-être à ne pas être un simple rouage et à gripper la machine volontairement. En outre, Petrov était sobre ce soir-là, ce qui n'était pas le cas de son supérieur, totalement ivre aux moments des faits. Le destin tient parfois à une bouteille de vodka. ■

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

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE RENTRÉE 1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité www.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			✓
10 € DE RÉDUCTION		✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€	69€ Au lieu de 114,40€	89€ Au lieu de 174,40€
	29 % de réduction *	40 % de réduction *	49 % de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG18REN



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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE
INTÉGRALE**
 • 12 n° du magazine papier
 • 4 Hors-série papier
 • Accès illimité aux contenus en ligne
89€
 Au lieu de 174,40€
- ☐ **FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**
 • 12 n° du magazine papier
 • 4 Hors-série papier
69€
 Au lieu de 114,40€
- ☐ **FORMULE
PAPIER**
 • 12 n° du magazine papier
59€
 Au lieu de 82,80€

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:

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.

L'ESSENTIEL

> La géométrie tropicale est un champ mathématique récent, apparu dans les années 1980.

> Cette géométrie repose sur une algèbre dite tropicale, où l'on remplace l'addition de deux termes par la prise de leur maximum, et la multiplication par l'addition.

> Dans cette géométrie, les objets les plus simples, les courbes tropicales, ressemblent à des réseaux de segments et de demi-droites.

> Ils ont des propriétés analogues à celles des courbes de la géométrie algébrique classique, qu'ils permettent donc d'étudier par un autre biais.

L'AUTEUR



ANTOINE CHAMBERT-LOIR
professeur de mathématiques à l'université Paris-Diderot, spécialisé en géométrie algébrique et arithmétique

Quand la géométrie devient tropicale

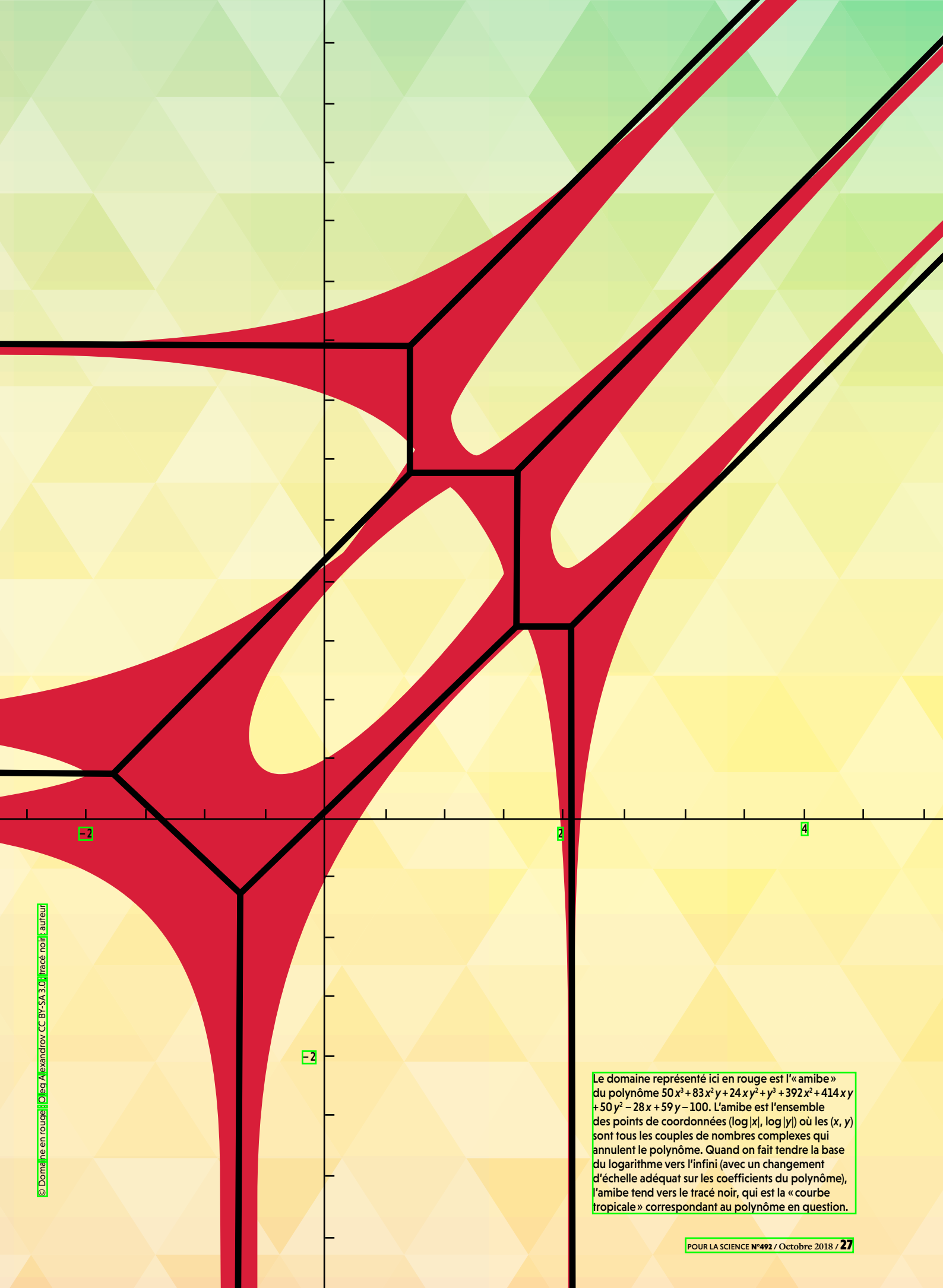
Prendre l'équation d'une courbe, remplacer l'addition et la multiplication par deux opérations plus exotiques, et étudier l'objet géométrique qui en résulte : c'est ce que fait la géométrie tropicale, un domaine récent des mathématiques. Qui profite aussi à la géométrie plus classique.

-4

En mathématiques, pour étudier les propriétés de certains objets, il est fréquent qu'il soit plus commode ou plus fructueux de passer par des objets de nature très différente. Les exemples de tels détours sont légion. L'un des plus élémentaires et des plus répandus est le détour par les nombres complexes (ceux de la forme $a+ib$, où a et b sont des nombres réels et i un nombre imaginaire qui vérifie $i^2=-1$) pour résoudre ou étudier des équations ne mettant en œuvre que des coefficients et variables réels. D'ailleurs, le recours aux nombres complexes, que ce soit en analyse, en algèbre ou en géométrie, est tellement universel que, sans lui, les mathématiques d'aujourd'hui n'existeraient pas.

On peut voir la géométrie tropicale, dont il va être question ici, de la même façon. Ce domaine, qui n'a commencé à émerger que dans les années 1980, repose sur une algèbre particulière qui était apparue dans divers contextes des mathématiques discrètes et de l'informatique.

La géométrie tropicale est à présent un champ de recherche très actif, intéressant en soi mais aussi utile à d'autres domaines des mathématiques, en particulier la géométrie algébrique (l'étude des objets géométriques définis par des équations algébriques, construites à l'aide de l'addition et de la multiplication). Ses objets, les courbes tropicales (et, plus généralement, les «variétés» tropicales), ont des propriétés parfois analogues à celles que l'on découvre en géométrie



Le domaine représenté ici en rouge est l'« amoeba » du polynôme $50x^3 + 83x^2y + 24xy^2 + y^3 + 392x^2 + 414xy + 50y^2 - 28x + 59y - 100$. L'amoeba est l'ensemble des points de coordonnées $(\log|x|, \log|y|)$ où les (x, y) sont tous les couples de nombres complexes qui annulent le polynôme. Quand on fait tendre la base du logarithme vers l'infini (avec un changement d'échelle adéquat sur les coefficients du polynôme), l'amoeba tend vers le tracé noir, qui est la « courbe tropicale » correspondant au polynôme en question.

algébrique. De ce fait, le passage par la géométrie tropicale permet de découvrir, calculer ou prouver, parfois plus facilement, certaines propriétés des objets de la géométrie algébrique. On l'illustrera ici en montrant comment les courbes tropicales permettent d'aborder un problème de géométrie énumérative, partie de la géométrie algébrique qui consiste à compter les points, courbes, surfaces, etc. vérifiant certaines conditions.

Partons du célèbre postulat d'Euclide: «Par deux points distincts, il passe une droite et une seule», en cherchant à y remplacer la figure géométrique d'une droite par une autre figure géométrique. Considérons par exemple un cercle, et posons les deux questions suivantes: combien faut-il de points du plan pour déterminer un cercle passant par eux? Combien de cercles n points déterminent-ils? On observe d'abord que par deux points A et B donnés, il passe une infinité de cercles. En revanche, si l'on se donne un troisième point C qui n'est pas sur la droite (AB), il n'existe qu'un seul cercle passant par A, B, C: c'est le cercle circonscrit au triangle ABC.

La question devient un peu plus riche si l'on prend pour figure géométrique une conique. Comme le suggère leur nom, il s'agit des courbes tracées par l'intersection d'un cône et d'un plan. Elles sont essentiellement de trois sortes: les ellipses, les paraboles et les hyperboles (voir la figure page ci-contre). Les courbes du premier type, les ellipses, sont fondamentales en mécanique céleste: ce sont par exemple celles que décrivent les planètes autour du Soleil. Celles du deuxième type sont aussi très importantes dans la vie de tous les jours, puisque c'est d'elles que les antennes satellites – paraboliques – tirent leur forme.

COMPTER DES COURBES RATIONNELLES

Au XVII^e siècle, Pascal avait démontré que par cinq points quelconques, tels que quatre quelconques d'entre eux ne sont pas alignés, il passe une conique, et une seule (voir la figure page 30). L'une des questions qui se posent naturellement en géométrie est s'il est possible de trouver des énoncés analogues pour d'autres familles de courbes. La réponse est oui, comme nous allons le voir.

Les droites et les coniques du plan ont deux qualités, qu'on retrouvera dans les autres courbes en question. Tout d'abord, ce sont des «courbes rationnelles», c'est-à-dire que l'on peut paramétrer les coordonnées de leurs points à l'aide de fractions rationnelles d'une variable t (rappelons qu'une «fraction rationnelle» en t est un quotient $P(t)/Q(t)$ de deux polynômes P et Q , et qu'un polynôme de degré n en la variable t est une expression de la forme $a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n$, où les a_i sont les coefficients du polynôme).

POURQUOI 3D – 1 POINTS POUR LES COURBES DE DEGRÉ D?

Expliquons pourquoi il faut fixer $3d - 1$ points pour qu'il n'y ait qu'un nombre fini N_d de courbes rationnelles de degré d passant par ces points.

Un paramétrage de degré d d'une courbe rationnelle est de la forme :
 $x(t) = (\alpha_0 + \alpha_1 t + \dots + \alpha_d t^d) / (\gamma_0 + \gamma_1 t + \dots + \gamma_d t^d)$,
 $y(t) = (\beta_0 + \beta_1 t + \dots + \beta_d t^d) / (\gamma_0 + \gamma_1 t + \dots + \gamma_d t^d)$.
 Ce paramétrage dépend des $3(d + 1)$ coefficients (ou paramètres !) $\alpha_0, \dots, \alpha_d, \beta_0, \dots, \beta_d, \gamma_0, \dots, \gamma_d$. Cependant, on peut diviser le numérateur et le dénominateur de chacune de ces fractions rationnelles par le même nombre, par exemple γ_d , ce qui élimine un paramètre, de sorte que nous n'avons que $3(d + 1) - 1 = 3d + 2$ paramètres effectifs. Par ailleurs, on peut changer le paramétrage d'une courbe rationnelle sans changer la courbe en remplaçant t par $(at + b)/(ut + w)$; cela fait encore chuter le nombre de paramètres effectifs de $4 - 1 = 3$. Ainsi, finalement, les courbes rationnelles de degré d dépendent de $(3d + 2) - 3 = 3d - 1$ paramètres.

Maintenant, imposons qu'une telle courbe passe par un point M du plan revient à ajouter un paramètre t_M (l'« instant » auquel la courbe paramétrée passe par le point M) et à ajouter les deux équations $x(t_M) = x_M$ et $y(t_M) = y_M$; imposer le passage par le point M fait donc perdre un degré de liberté. Par conséquent, lorsqu'on impose à une courbe rationnelle plane

de degré d , qui dépend *a priori* de $3d - 1$ paramètres, de passer par $3d - 1$ points donnés, il n'y a plus aucun paramètre dont pourraient dépendre les courbes recherchées. À une réserve près, cependant : que les conditions imposées par les $3d - 1$ points ne soient pas redondantes entre elles, ce qui arrive parfois. S'il n'y a pas redondance, on dit que les points sont en position générale (ils font alors tous chuter le nombre de degrés de liberté d'une unité chacun).

Grâce à une théorie algébrique aujourd'hui classique, fort justement appelée théorie de l'élimination, on peut éliminer un à un les paramètres auxiliaires t_M ajoutés dans cette analyse. On se retrouve alors avec un énorme système d'équations polynomiales dont les inconnues sont les paramètres initiaux $\alpha_0, \dots, \alpha_d, \beta_0, \dots, \beta_d, \gamma_0, \dots, \gamma_d$. Ce système n'a qu'un nombre fini de solutions, et c'est précisément ce nombre (N_d) que calcule la formule de Maxim Kontsevich.

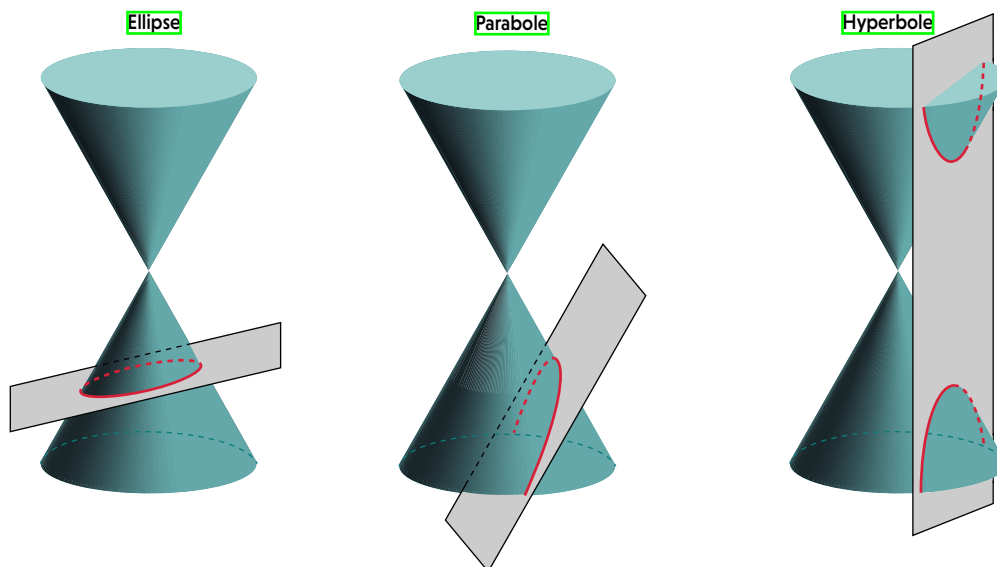
Il y a deux aspects, classiques mais subtils, dans ce décompte. D'une part, toutes les solutions des équations polynomiales en jeu ne sont pas forcément des nombres réels, et il faut prendre en compte les valeurs complexes. D'autre part, chaque solution a sa « multiplicité ».

Pour décrire ces deux phénomènes, et montrer leur importance, il est plus simple de considérer le cas d'une équation polynomiale à une inconnue, que l'on peut écrire sous la forme $F(x) = x^n + c_{n-1} x^{n-1} + \dots + c_0 = 0$. Son degré est n , et le théorème de d'Alembert-Gauss (parfois appelé théorème fondamental de l'algèbre) garantit qu'il existe des nombres complexes $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ tels que $F(x) = (x - \alpha_1) \dots (x - \alpha_n)$. Ces nombres complexes sont toutes les solutions de l'équation $F(x) = 0$, et la multiplicité d'une solution est le nombre de fois qu'elle apparaît.

Par exemple, la factorisation $x^4 - 4x^3 + 10x^2 - 12x + 5 = (x - 1)^2 (x - 1 - 2i) (x - 1 + 2i)$ montre que les solutions de l'équation $x^4 - 4x^3 + 10x^2 - 12x + 5 = 0$ sont 1 (multiplicité 2), $1 + 2i$ (multiplicité 1) et $1 - 2i$ (multiplicité 1).

C'est parce que l'on compte toutes les racines, réelles ou complexes, avec leur multiplicité, que le théorème de d'Alembert-Gauss prend une forme très agréable : une équation polynomiale de degré n a exactement n solutions.

Les coniques (en rouge) sont les courbes nées de l'intersection d'un cône et d'un plan. Ces courbes peuvent être décrites par des équations polynomiales $F(x, y) = 0$ de degré 2. On peut aussi les représenter sous forme paramétrique, les coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ de leurs points étant données par des fractions $P(t)/Q(t)$, où P et Q sont des polynômes en t de degré 2 au plus.



Par exemple, la droite passant par deux points A et B du plan, de coordonnées respectives (x_A, y_A) et (x_B, y_B) , admet le paramétrage suivant :

$$\begin{aligned} x(t) &= (1-t)x_A + tx_B, \\ y(t) &= (1-t)y_A + ty_B, \end{aligned}$$

de façon que quand le paramètre t décrit l'ensemble des nombres réels, le point $(x(t), y(t))$ décrit toute la droite (AB).

Le paramétrage d'une conique est plus subtil, mais se déduit d'une construction géométrique simple ; pour le cercle de centre O et de rayon 1, on obtient : $x(t) = (1-t^2)/(1+t^2)$, $y(t) = 2t/(1+t^2)$.

Les courbes rationnelles peuvent aussi être décrites par une équation $F(x, y) = 0$ où F est un polynôme en x et y . Cette équation polyno-

me sont bien sûr intéressés aux courbes rationnelles de degrés supérieurs.

En 1993, le mathématicien russe Maxim Kontsevich, aujourd'hui professeur permanent à l'IHES (Institut des hautes études scientifiques), près de Paris, a résolu une question qui se posait alors, et dont les droites et les coniques forment les deux premiers cas. Nous avons vu que par deux points, il ne passe qu'une seule droite, et que par cinq points, il ne passe qu'une seule conique. Il s'agissait de généraliser et de déterminer, pour tout entier positif d , le nombre N_d de courbes rationnelles planes de degré d passant par $3d-1$ points. Ces nombres sont des « invariants de Gromov-Witten », issus de considérations mathématiques plus générales inspirées par la théorie des cordes en physique, et nommés d'après Mikhaïl Gromov, qui travaille lui aussi à l'IHES, et Edward Witten, physicien-mathématicien de l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis.

Plus précisément, Maxim Kontsevich a démontré la formule de récurrence, assez incroyable, selon laquelle N_d est égal à : $\sum (a^2 b^2 C(3d-4, 3a-2) - a^3 b C(3d-4, 3a-1)) N_a N_b$, où la somme $\sum$ porte sur tous les entiers positifs a et b tels que $a+b=d$ et où $C(p, q)$ désigne ici le coefficient binomial $p! / [q! (p-q)!]$, avec $p! = p \times (p-1) \times (p-2) \times \dots \times 2 \times 1$.

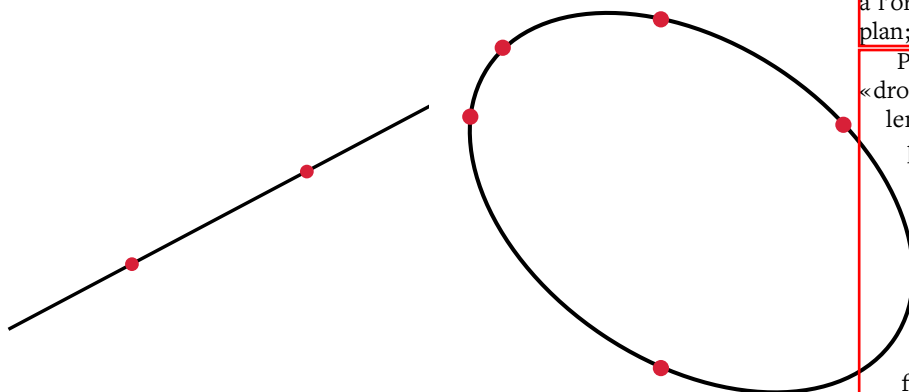
Compte tenu de $N_1 = 1$, cette formule permet de calculer tous les autres N_d de proche en proche. En particulier, on retrouve $N_2 = 1$ (comme Pascal l'avait prouvé en géométrie pure), $N_3 = 12$ (autrement dit, par 8 points donnés, il passe en général 12 courbes de degré 3, c'est-à-dire cubiques), $N_4 = 620$ (calculé par le mathématicien danois Hieronymus Zeuthen en 1873), $N_5 = 87304$ (qui avait été calculé juste avant que Maxim Kontsevich ne présente sa formule). Mais on obtient aussi les valeurs inédites : $N_6 = 26\,312\,976$, $N_7 = 14\,616\,808\,192$, $N_8 = 13\,525\,751\,027\,392$, etc.

L'entier $3d-1$ qui apparaît dans le problème résolu par Maxim Kontsevich peut sembler >

On cherchait le nombre de courbes rationnelles planes de degré d passant par $3d-1$ points

miale est de la forme $ax+by+c=0$ dans le cas d'une droite, et $x^2+y^2=R^2$ pour le cercle de rayon R centré en l'origine. Le degré d de F est le degré de la courbe rationnelle plane ; il est égal à 1 pour les droites, à 2 pour le cercle et les autres coniques.

Cependant, les droites et les coniques ne sont que les premiers exemples de courbes rationnelles planes, et les mathématiciens se



8 mystérieux, mais, pour $d=1$ ou 2 , on trouve 1 ou 5, le nombre de points qu'il s'agissait de fixer pour déterminer une droite ou une conique. Pour comprendre pourquoi, en général, $3d-1$ points déterminent un nombre fini de courbes rationnelles, on peut procéder à un décompte des paramètres à l'aide desquels les courbes sont décrites (voir l'encadré page 28).

Quelques années après ces travaux de Maxim Kontsevich, la géométrie des « courbes tropicales » a permis d'aborder la question sous un nouvel angle. Que sont ces objets ? Pour les introduire, revenons aux courbes rationnelles planes qui, comme la droite et le cercle, peuvent aussi être définies par une équation polynomiale $F(x, y)=0$ avec deux variables (ou coordonnées) x et y . Même si l'on continue à parler de courbe, les mathématiciens considèrent généralement, pour de multiples raisons, que ces deux coordonnées peuvent aussi prendre des valeurs complexes.

Dans ce cas, chaque coordonnée représente, de facto, deux coordonnées réelles, sa partie réelle (a dans un nombre $a+ib$) et sa partie imaginaire (b dans $a+ib$). Autrement dit, nous avons maintenant quatre coordonnées réelles, liées par une équation $F(x, y)=0$ qui équivaut en fait à deux équations, une première pour la partie réelle de F et une seconde pour sa partie imaginaire. Quatre coordonnées, deux relations : c'est plutôt une surface à laquelle on a affaire, dans un espace à quatre dimensions – quelque chose de délicat à visualiser !

L'étude des propriétés d'un tel objet est difficile en général, et divers outils et méthodes ont été élaborés dans ce contexte. Notamment, dans les années 1990, les mathématiciens d'origine russe Israel Gelfand, Mikhail Kapranov et Andrei Zelevinsky ont eu l'idée de visualiser à l'aide de coordonnées logarithmiques la taille des nombres complexes x et y qui sont solution d'une équation polynomiale $F(x, y)=0$. Plus précisément, l'idée est de tracer l'ensemble A_F des points de coordonnées $(u, v)=(\log|x|, \log|y|)$, où (x, y) parcourt toutes les solutions de l'équation $F(x, y)=0$ (la notation $|x|$ désigne le module de x : si $x=a+ib$, alors $|x|=\sqrt{(a^2+b^2)}$, la distance

Par deux points, il passe une seule droite. Par cinq points, il passe une seule conique (ici, en l'occurrence, une ellipse). Pour les courbes de degré supérieur, il existe des relations analogues qui ont été démontrées récemment dans toute leur généralité. Une preuve passant par la géométrie tropicale a été donnée vers 2005.

à l'origine du point représentatif de x dans le plan ; c'est la valeur absolue de x si x est réel).

Prenons l'exemple, très simple, de la « droite » d'équation $x+y=1$ (on a mis des guillemets, car il faut se souvenir que x et y peuvent prendre des valeurs complexes, et donc que cette équation représente un objet géométrique plus compliqué, dans un espace à quatre dimensions). On cherche alors les couples de nombres réels $(u, v)=(\log|x|, \log|y|)$ tels que les nombres complexes x et y vérifient $x+y=1$. Dans ce cas, on peut faire le calcul relativement aisément. On trouve que les points (u, v) constituent le domaine du plan délimité par les trois courbes d'équations $v=\log(e^u+1)$ pour tout u , $v=\log(1-e^u)$ pour $u<0$ et $v=\log(e^u-1)$ pour $u>0$ (voir la figure page ci-contre).

D'UNE ÉQUATION POLYNOMIALE À SON AMIBE

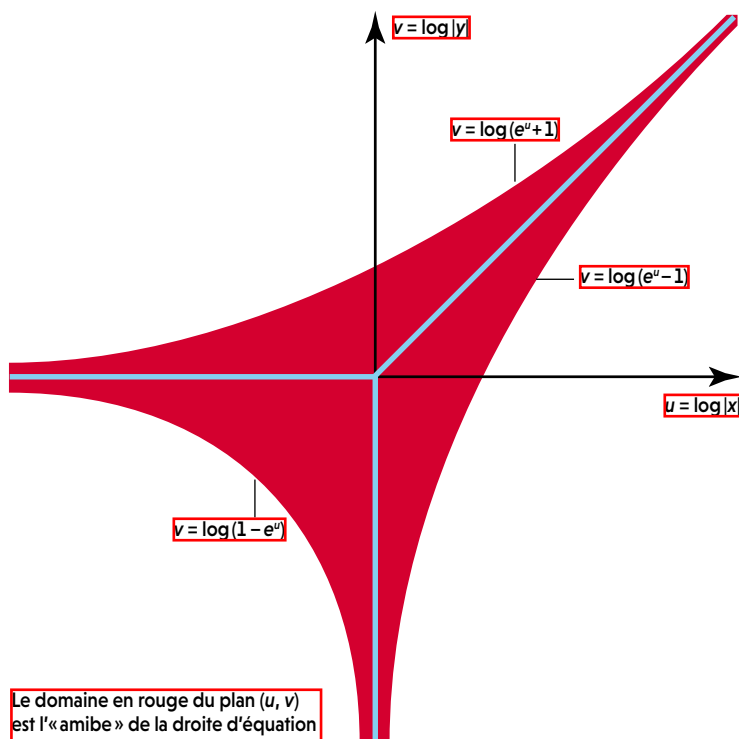
Ce domaine présente des sortes de tentacules, caractéristique que l'on retrouve pour les autres équations (ou courbes) $F(x, y)=0$ et qui explique pourquoi les ensembles A_F ont été appelés « amibes ».

Que sont, justement, les trois tentacules de l'amibe de la droite $x+y=1$? Ils correspondent aux points de cette droite dont les coordonnées sont soit très grandes ($\log|x|$ tend vers $+\infty$), soit au contraire très petites ($\log|x|$ tend vers $-\infty$). Ainsi, le tentacule du haut à droite correspond

On « tropicalise » un polynôme en remplaçant l'opération $+$ par $\max$, et l'opération $\times$ par $+$

aux points dont les coordonnées (x, y) sont toutes deux grandes ; dans ce cas, la constante 1 est négligeable devant x et y , et l'équation $x+y=1$ se simplifie en $x \approx -y$; en particulier, on a $|x| \approx |y|$ et l'on voit pourquoi ce tentacule s'approche de la diagonale d'équation $v=u$. Le tentacule de gauche correspond au cas où x est petit : dans ce cas, $y=1-x$ est proche de 1 et $v=\log|y|$ est proche de 0. De la même façon, le tentacule du bas correspond au cas où y est petit.

Sur la figure, on a aussi représenté le « squelette » de l'amibe ; pour $x+y=1$, il est constitué



Le domaine en rouge du plan (u, v) est l'«amibe» de la droite d'équation $x+y-1=0$, où l'on considère x et y comme des variables complexes. Son squelette (en bleu) est la «droite tropicale» correspondant au polynôme $x+y-1$. Cette droite tropicale est donnée par les points (u, v) pour lesquels le maximum $\max(u, v, 0)$ est atteint en au moins deux de ces trois arguments u, v et 0 .

de trois demi-droites issues de l'origine. Une première façon de comprendre ce squelette, mise en avant par plusieurs mathématiciens, en particulier les Russes Victor Maslov et Oleg Viro, consiste à changer d'échelle et à tracer la même amibe en remplaçant le logarithme naturel (népérien, de base $e=2,718...$) par un logarithme de base supérieure. L'amibe se contracte alors autour de son squelette (voir la figure ci-dessous).

QUAND L'ALGÈBRE TROPICALE POINTE SON NEZ...

Il y a une façon plus algébrique de comprendre ce processus. La fonction logarithme transforme une multiplication en addition: si $z=xy$, on a $\log z = \log x + \log y$. Ainsi, si l'on note $u = \log x$, $v = \log y$ et $w = \log z$, on a $w = u + v$.

En même temps, la loi d'addition devient plus étrange: si $z = x + y$, on a $\log z = \log(x+y) = \log(e^{\log x} + e^{\log y})$, c'est-à-dire $w = \log(e^u + e^v)$.

Mais cette étrangeté se simplifie lorsqu'on va au bout du changement d'échelle: pour un

logarithme de base b , cette formule devient $w = \log_b(b^u + b^v)$ et son membre de droite converge, lorsque b tend vers l'infini, vers le plus grand des deux nombres u et v , c'est-à-dire que l'on a, dans cette limite, $w = \max(u, v)$.

Autrement dit, poussé à son terme, le changement d'échelle de Maslov et Viro déforme les lois familières d'addition (+) et de multiplication ($\times$) vers les «lois exotiques» max et +, respectivement. Nous entrons enfin dans le domaine qui fait l'objet de cet article, car ces deux dernières lois définissent ce qu'on appelle aujourd'hui l'algèbre tropicale, et plus anciennement l'algèbre max-plus.

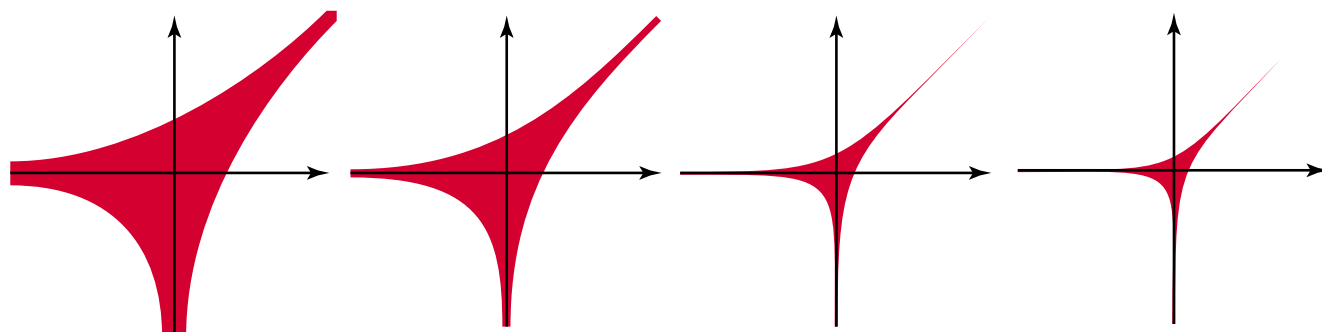
On peut traduire dans cette algèbre n'importe quelle expression polynomiale, en remplaçant l'opération + par l'opération max, et l'opération $\times$ par l'addition usuelle, comme si l'on prenait le logarithme selon la procédure ci-dessus. Un monôme de la forme ax^n sera ainsi traduit en l'expression $\log|a| + nu$, et un polynôme tel que $-2 + 5x^2 + (-4)y^3$ sera ainsi traduit en $\max(\log 2, \log 5 + 2u, \log 4 + 3v)$.

DES AMIBES AUX COURBES TROPICALES

Appliquons cette règle à l'équation de notre droite-modèle, écrite sous la forme $x+y-1=0$, en traduisant le membre de gauche dans cette algèbre tropicale. On obtient alors l'expression $\max(u, v, 0)$, qui fournit la clé de la compréhension du squelette de notre amibe. En effet, les trois demi-droites qui constituent ce squelette correspondent exactement aux points de coordonnées (u, v) telles que le maximum de u, v et 0 est atteint en au moins deux de ces trois arguments (par exemple, si le maximum est atteint pour les deux premiers des trois arguments u, v et 0 , cela signifie que $u=v$ et que $u > 0, v > 0$: c'est la demi-droite diagonale du squelette). Ce squelette est la «courbe tropicale» correspondant à l'équation $x+y-1=0$.

Ces considérations se généralisent à toute équation polynomiale, à laquelle on peut donc associer une amibe et son squelette, c'est-à-dire la courbe tropicale correspondante. La compréhension de ces amibes et de leurs squelettes, pour des polynômes F plus généraux que l'exemple choisi ici, constitue un difficile sujet

Quand on augmente la base du logarithme utilisé pour calculer l'amibe (ici celle de l'équation $x+y-1=0$), l'amibe se contracte. À la limite où la base tend vers l'infini, l'amibe se réduit à son squelette.



de recherches actuelles. Même obtenir une représentation graphique précise de ces objets n'est pas si aisé.

L'un des résultats connus, et que l'on peut constater dans notre exemple, est que la région du plan complémentaire de l'amibe est une réunion d'un nombre fini de domaines convexes. Autrement dit, étant donnés deux points hors de l'amibe, soit on peut les relier par un segment qui ne touche pas l'amibe, soit on ne peut même pas les relier par une courbe continue.

Prenons un autre exemple, un peu plus compliqué : le polynôme $F(x, y) = 1 + 2xy + x^3 + y^3$. Comme on l'a fait plus haut, la tropicalisation de F est définie en interprétant F dans l'algèbre tropicale et en prenant les logarithmes des coefficients. On obtient :

$$F_{\text{trop}}(u, v) = \max(0, \log 2 + u + v, 3u, 3v).$$

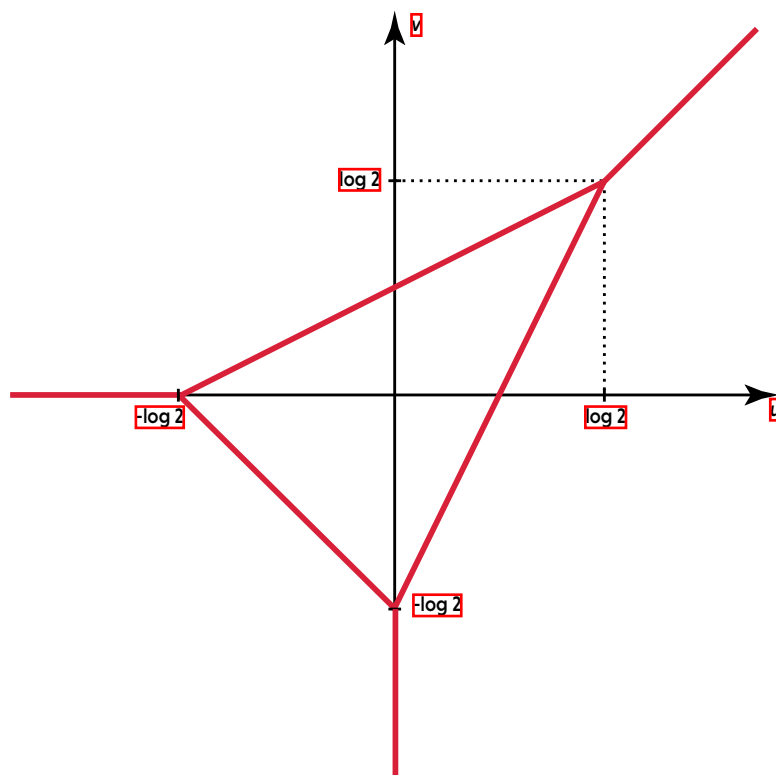
La « courbe tropicale » correspondante (voir la figure ci-contre) est définie comme précédemment : c'est l'ensemble des (u, v) pour lesquels ce maximum est atteint en deux termes au moins (c'est-à-dire en au moins deux des arguments $0, \log 2 + u + v, 3u$ et $3v$).

Comme dans l'exemple précédent, cette courbe tropicale est un ensemble linéaire par morceaux, constitué ici de trois segments et de trois demi-droites. Cette linéarité par morceaux est une propriété générale des courbes tropicales. Une autre, un peu plus difficile à décrire, est une condition d'équilibre en chacun des points multiples, où se rejoignent plusieurs lignes. Chaque branche issue d'un tel point a un vecteur directeur primitif, c'est-à-dire que ses deux coordonnées sont des entiers premiers entre eux ; la théorie lui attribue également un poids, qui est un nombre entier positif. La condition d'équilibre stipule qu'en chaque sommet, la somme de ces vecteurs primitifs, pondérée par leurs poids, est nulle.

Pourquoi s'intéresser aux courbes tropicales ? L'un de leurs attraits est qu'elles ont des propriétés de nature essentiellement combinatoire, tout en reflétant assez fidèlement la géométrie des « courbes » algébriques sous-jacentes, ces objets définis par des équations polynomiales $F(x, y) = 0$ où x et y sont des coordonnées complexes.

DES APPLICATIONS À LA GÉOMÉTRIE ALGÈBRE

Au cours des dernières années, de nombreux mathématiciens ont étendu des théorèmes classiques de la géométrie algébrique au contexte de la géométrie tropicale. Il en est ainsi du « théorème de Bézout » qui établit que le nombre de points d'intersection de deux courbes tropicales est égal au produit de leurs degrés (voir la figure page suivante). Bien que plus élémentaire que l'énoncé correspondant en géométrie algébrique, la variante tropicale en fournit un raffinement, car, outre le nombre de points



UNE COURBE TROPICALE

Cette figure linéaire par morceaux est la « courbe tropicale » associée au polynôme $F(x, y) = 1 + 2xy + x^3 + y^3$. Elle correspond à l'ensemble des points (u, v) du plan tels que le maximum de $0, \log 2 + u + v, 3u, 3v$ est atteint en au moins deux de ces quatre arguments.

d'intersection, le théorème fournit aussi des informations sur leurs positions.

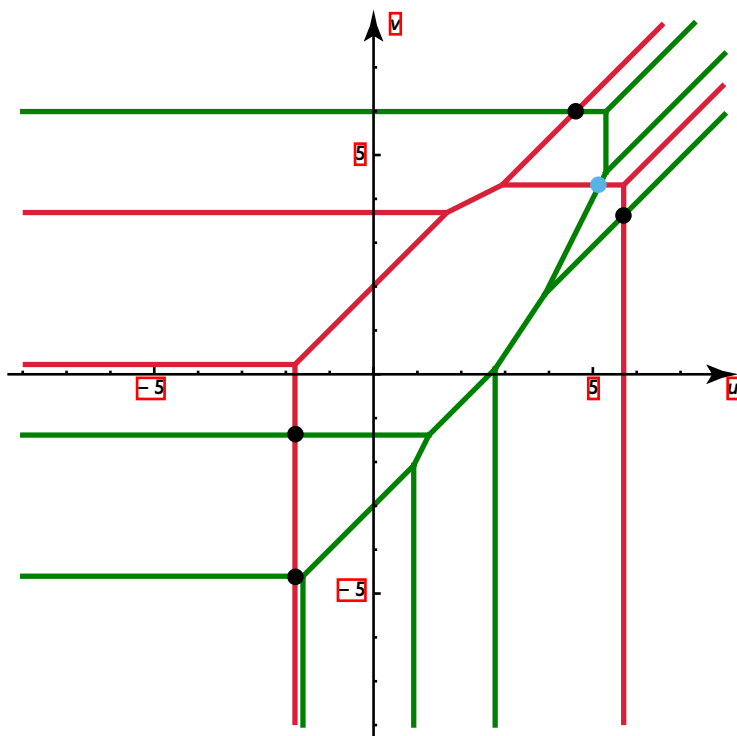
De façon plus importante, la géométrie tropicale a permis de fournir de nouvelles démonstrations, plus simples, de résultats difficiles.

La première application concernait les invariants de Gromov-Witten, les nombres N_d mentionnés au début de cet article. On doit en effet à Grigory Mikhalkin, de l'université de Genève, un remarquable « principe de correspondance », qui établit pour l'essentiel une bijection entre les courbes algébriques de degré d et leurs analogues tropicales. Par ailleurs, Andreas Gathmann et Hannah Markwig, à l'université de Kaiserslautern, en Allemagne, ont prouvé vers 2005 l'analogue tropical de la formule de Kontsevich. La combinaison de ces deux travaux fournit ainsi une nouvelle démonstration de la relation de récurrence de Kontsevich.

Ces techniques tropicales avaient aussi permis de calculer les analogues, en géométrie réelle, des invariants de Gromov-Witten. Ils portent toujours sur des courbes, mais on impose maintenant que les coefficients des équations de celles-ci soient des nombres réels, et non plus des nombres complexes. Le décompte de ces courbes est en général très mystérieux, mais Jean-Yves Welschinger,

INTERSECTION DE COURBES TROPICALES

Comme pour des courbes algébriques classiques, le nombre de points d'intersection de deux courbes tropicales est égal, en général, au produit de leurs degrés. Ici, la conique tropicale (degré 2) associée au polynôme $x^2 + 4xy - 300x - 40y - 50$ (en rouge) croise la cubique tropicale (degré 3) liée au polynôme $x^3/8 + x^2y + 2xy^2 + y^3 + 2x^2 + 15xy + 400y^2 + 5x + 100y + 1$ (en vert) en $2 \times 3 = 6$ points (on montre que le point d'intersection bleu, proche de (5, 5), est de multiplicité 2 : il compte double).



Payne, à l'université Yale, ont pu démontrer pour certaines familles de courbes algébriques (celles de « genres » 22 et 23) une propriété, jusque-là inconnue, de leurs espaces de paramètres, à savoir qu'ils sont « de type général ». La conséquence la plus simple est qu'il n'est pas possible, pour ces genres-là, de décrire toutes les courbes algébriques uniquement à l'aide de fonctions rationnelles (de plusieurs variables).

DÉFORMER L'OBJET D'ÉTUDE JUSQU'À LE RENDRE DÉGÉNÉRÉ

La raison de l'efficacité de la géométrie tropicale, branche toute neuve, presque balbutiante, est encore un peu mystérieuse, mais rappelons-nous que les courbes tropicales sont, justement, des dégénérescences (lorsque la base des logarithmes tend vers l'infini) d'amibes de courbes algébriques. Ainsi, la géométrie tropicale met implicitement en œuvre un mécanisme omniprésent en géométrie moderne : déformer l'objet d'étude jusqu'à le rendre « dégénéré » et vérifier que certaines propriétés restent conservées tout au long de la déformation, y compris à son aboutissement. Mais ce faisant, elle fournit des modèles combinatoires plus simples pour la dégénérescence, et permet ainsi non seulement de revenir sur des questions classiques de géométrie algébrique, mais aussi de les dépasser.

La suite de l'histoire reste à écrire. Mais pour terminer, répondons à une question qui n'aura pas manqué d'intriguer les lectrices et lecteurs : pourquoi l'adjectif « tropical » qualifie-t-il l'algèbre et la géométrie dont on a esquissé ici quelques éléments ? En mathématiques, beaucoup de termes sont tirés du langage courant sans que leur sens technique ait un rapport évident ou pertinent avec leur sens courant. C'est le cas ici. L'algèbre formée en utilisant les opérations max et + au lieu des opérations + et × avait été nommée algèbre exotique, puis algèbre max-plus jusqu'à la fin des années 1980. Elle est devenue depuis « algèbre tropicale » sous l'impulsion de quelques chercheurs en informatique théorique de l'université Paris-VII, qui ont voulu rendre hommage à leur collègue brésilien Imre Simon, pionnier du domaine. L'exotisme a des facettes diverses ! ■

aujourd'hui à l'université de Lyon, avait découvert en 2002 qu'il convenait de les compter certaines positivement et les autres négativement, définissant ainsi des invariants W_d analogues aux entiers N_d .

Pour ces nombres, Ilia Itenberg (Sorbonne Université et École normale supérieure, à Paris), Viatcheslav Kharlamov (université de Strasbourg) et Eugenii Shustin (université de Tel-Aviv) ont pu établir en 2009 une relation de récurrence d'où il découle, par exemple, que $W_3 = 8$, $W_4 = 240$, etc. Autrement dit, s'il y a $N_3 = 12$ cubiques rationnelles passant par 8 points généraux réels, seules $W_3 = 8$ sont réelles. Compte tenu de la règle de comptage « avec signes », cela signifie en fait qu'il y en a 8 (toutes comptées avec le même signe), 10 (une a un signe opposé des neuf autres) ou 12 (deux ont un signe opposé des dix autres) ; le nombre précis dépend des positions des 8 points choisis.

Plus récemment encore, la géométrie tropicale a fourni une clé pour accéder à certaines propriétés des courbes algébriques, planes ou non, ainsi qu'à des propriétés de certains espaces, introduits par Bernhard Riemann au milieu du XIX^e siècle, qui paramétrisent toutes ces courbes algébriques de façon naturelle. Par exemple, en 2012, Filip Cools, Jan Draisma, Sam Payne et Elina Robeva ont pu reprouver, par les outils de la géométrie tropicale, une conjecture d'Alexander von Brill et Max Noether énoncée en 1874 et dont la première démonstration datait de 1980. Et il y a quelques mois, David Jensen, à l'université du Kentucky, et Sam

BIBLIOGRAPHIE

J. Rau, **A first expedition to tropical geometry**, 2017 (<https://bit.ly/2o6Bzn2>).

E. Brugallé et K. Shaw, **A bit of tropical geometry**, 2014 (<https://arxiv.org/abs/1311.2360>).

I. Itenberg, **Droites tropicales**, *Images des Mathématiques*, CNRS, 2011 (<http://images.math.cnrs.fr/Droites-tropicales.html>).

I. Itenberg, **Géométrie tropicale et dénombrement de courbes**, dans *Leçons de mathématiques d'aujourd'hui*, vol. 4, pp. 107-125 (éd. : F. Bayart et E. Charpentier), Cassini, 2010.

G. Cohen et al., **L'algèbre des sandwiches**, *Pour la Science* n° 328, pp. 56-63, février 2005.

J. Richter-Gebert et al., **First steps in tropical geometry**, 2003 (<https://arxiv.org/abs/math/0306366>).



Un crocodile américain (*Crocodylus acutus*) aux dents impressionnantes croise nonchalamment dans les eaux de l'archipel des Jardines de la Reina, au sud de Cuba.

L'ESSENTIEL

> Les crocodiliens, le groupe rassemblant les espèces apparentées aux crocodiles, règnent sur les rives depuis des dizaines de millions d'années.

> L'étude de la mécanique de leurs mâchoires et de leurs

régimes alimentaires fournit les clés de leur succès évolutif.

> Ces recherches aident à comprendre les habitudes alimentaires d'autres animaux, dont les dinosaures.

L'AUTEUR



GREGORY M. ERICKSON
professeur de paléobiologie
et d'anatomie à l'université
de Floride, aux États-Unis

Les crocodiliens, champions de la morsure

Avec quelle force mord un crocodile marin, un caïman ou un gavial ? Pendant près de vingt ans, des chercheurs se sont attachés à la mesurer... à leurs risques et périls ! Les résultats éclairent le succès évolutif des crocodiliens et, par ailleurs, laissent penser que la pression dentaire du tyrannosaure avoisinait 30 tonnes par centimètre carré.

Par une torride journée d'été à Darwin, en Australie, je me tiens à trois mètres d'un spécimen du plus grand reptile actuel : un crocodile marin. Long de 5,2 mètres, ce mâle pèse environ 570 kilogrammes (certains de ses congénères dépassent la tonne). Il me fixe de ses yeux inquiétants semblables à ceux d'un chat tandis que, périodiquement, sa poitrine se soulève juste avant que ses narines n'exhalent explosivement un jet bruyant, qui fait penser à une locomotive à vapeur.

Nous sommes peut-être en train de pousser nos recherches au-delà du raisonnable, me dis-je... Je me suis déjà approché de nombreuses reprises de crocodiles, mais jamais d'un tel géant. Dégoulinant de sueur et armé seulement d'un appareillage électronique et d'une perche en PVC de 1,2 mètre de long portant à son bout un capteur pour mesurer la force de la morsure de l'animal, je

m'approche par le côté à une soixantaine de centimètres de sa tête. Le crocodile s'agite, ouvre la gueule, exhibant 64 énormes dents pointues, et siffle, dantesque avertissement de ne pas s'approcher davantage. C'est le signal que j'attends : j'avance la perche et place le capteur de force à l'arrière de la gueule, entre les deux mâchoires. L'animal claque celles-ci instantanément, ce qui émet un bruit sourd faisant penser à l'écho d'un canon. Le choc m'arrache presque la perche des mains. Puis, c'est le silence.

Je rassemble alors mes esprits et tente de réaliser ce qui vient de se passer. Le reptile est parfaitement immobile, tout va bien pour moi et le matériel semble intact. À ma grande satisfaction, le capteur de force est parfaitement pris en sandwich entre les dents arrière du crocodile. « Bonne morsure », dis-je alors à Kent Vliet, mon collègue de l'université de Floride qui, debout derrière moi, tient l'appareil enregistrant le résultat. « Quelle était la force ? »

Il répond: « 1680 kilos! » Notre équipe et des badauds intéressés discutent avec animation du chiffre tandis que, tout en maintenant ma perche, j'attends que le crocodile libère le capteur. Une fois en sécurité, mon taux d'adrénaline redescend et je me rends compte de ce que nous venons de faire: mesurer la plus grande force de morsure jamais enregistrée chez un animal.

Cette étouffante journée australienne a constitué le point culminant de la série de recherches que je mène avec des collègues depuis dix-sept ans afin de comprendre la biomécanique de l'alimentation des crocodiliens, ordre de reptiles qui comprend aujourd'hui les crocodiles, les gavials, les alligators et les caïmans. Depuis plus de 85 millions d'années, ces superprédateurs dominent les eaux douces littorales et les estuaires des régions tropicales et tempérées chaudes. Les paléontologues s'interrogent depuis longtemps sur les raisons de leur succès évolutif. Or non seulement nos résultats expliquent la domination des crocodiliens actuels dans leurs habitats, ils élucident aussi comment leurs ancêtres en sont venus à régner sur les rives.

Les nombreux fossiles de crocodiliens montrent que la forme de leurs corps est restée en grande partie inchangée depuis des millions d'années. Leur taille a cependant

varié de 1 à 7 mètres. Et leurs museaux sont aussi variés que ceux des crocodiliens fossiles, chaque forme correspondant à un certain régime alimentaire. Les chercheurs distinguent ainsi: les museaux moyens à larges dents des crocodiliens à régime généraliste; les museaux étroits à dents fines et pointues des mangeurs de poissons ou de petites proies; les museaux larges et à grosses dents des mangeurs de mollusques et autres proies dures; et les museaux de chien de ceux qui se nourrissent en partie à terre. Ainsi, le rapprochement de la mécanique des mâchoires et du régime alimentaire des crocodiliens pourrait nous aider à mieux comprendre la survie de ces remarquables prédateurs ainsi que l'histoire de leurs ancêtres.

À l'époque où nous avons démarré nos recherches, les interprétations du museau, des types de dentition et des variations de taille n'étaient fondées que sur la spéculation et la modélisation, et très peu sur des données empiriques. Plusieurs raisons expliquaient ce manque de données: menacés par la surchasse, de nombreux crocodiliens sont difficiles d'accès; travailler auprès d'eux est dangereux; et pour couronner le tout, il n'existait aucune méthode de mesure des forces de morsure et des pressions exercées par les dents, ce qui est pourtant essentiel pour bien comprendre la mécanique des mâchoires. Cela allait changer.

En 2001, le producteur d'un film du *National Geographic* m'a contacté pour me demander si je saurais calculer la force de la morsure de *Sarcosuchus*, un crocodile géant du Crétacé (145 à 66 millions d'années). Long de 12 mètres, ce proche parent des crocodiles actuels a été découvert au Niger en 1964 par Philippe Taquet, l'ancien directeur du Muséum d'histoire naturelle à Paris. Puis, en 2000, dans le cadre d'une expédition du *National Geographic*, Paul Sereno, de l'université de Chicago, en ramena un squelette particulièrement complet.

J'ai répondu au producteur que je serais capable de déterminer la force de morsure de *Sarcosuchus* si je pouvais expérimenter sur des crocodiliens vivants. C'est pourquoi j'ai immédiatement appelé Kent Vliet pour lui proposer de mener avec moi une série d'expériences, car il est aussi le conseiller scientifique du Parc zoologique aux alligators de Saint Augustine. Ce parc d'attractions de Floride, l'un des plus anciens au monde, est aussi le seul établissement qui abritait les 23 espèces de crocodiliens connues alors.

J'avais l'intention d'abord de déterminer les forces de morsure et les pressions dentaires de chacune des espèces actuelles de crocodiliens sur des spécimens du parc, afin de vérifier que les valeurs observées dans les élevages permettent aussi d'estimer les performances des animaux sauvages. Je prévoyais ensuite de

Nous venions de mesurer la plus grande force de morsure jamais enregistrée

beaucoup varié, puisque des formes naines (moins de 1 mètre) ou géantes (plus de 9 mètres) sont maintes fois apparues dans le registre fossile. Chaque changement de la taille s'est accompagné de modifications du museau et des dents. De toute évidence, une grande partie des clés du succès évolutif des crocodiliens résident dans la forme, la fonction, la performance et la pertinence alimentaire du museau et des dents, sur lesquels il s'agit donc de récolter des informations.

Par chance, les 24 espèces actuelles de crocodiliens présentent, comme les espèces fossiles, un large spectre de tailles qui va de

comparer les données prélevées sur les animaux en captivité avec les résultats de mesures effectuées sur des animaux en liberté. Pour compléter, je prévoyais aussi des dissections et des expériences de stimulations musculaires sur des alligators, afin de pouvoir établir un modèle de la morsure chez les crocodiliens fossiles. Toutes les données recueillies devaient aussi servir à restituer les modes d'alimentation des crocodiliens éteints et d'espèces apparentées, les dinosaures par exemple.

Très vite, le propriétaire du Parc zoologique aux alligators de Saint Augustine nous accorda son autorisation, tandis que *National Geographic* apportait les fonds nécessaires. Il ne nous restait plus qu'à déterminer comment prélever nos données rapidement, avant le tournage du film.

DÉVELOPPER LES APPAREILS DE MESURE, ÉTABLIR LE PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

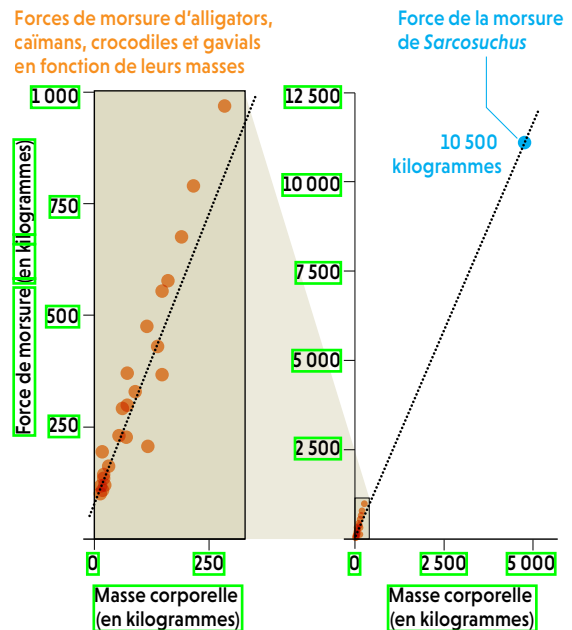
Comment mesurer la force de la morsure d'un crocodile? Je l'ignorais. Du reste, personne n'avait jamais mesuré directement cette force chez un gros animal et encore moins chez ces énormes carnivores! Ma seule expérience d'un travail comparable avait consisté, pendant mes études doctorales, à mesurer les forces de morsure de petits lézards à l'aide de pincettes équipées de jauges permettant d'évaluer la force requise pour les serrer. Je me suis donc attaché l'aide d'un ingénieur avec qui j'avais déjà travaillé à l'université Stanford, et par ailleurs celle d'un ingénieur d'études de chez Kistler. Cette société produit en effet des dispositifs enregistrant les forces de compression, sorte de transducteurs couramment utilisés dans l'industrie pour tester la résistance de matériaux. Ensemble, nous avons conçu des capteurs de force de morsure portables, adaptés aux mâchoires des crocodiles et à l'épreuve de l'eau.

Ces appareils, qui coûtent jusqu'à 10 000 euros, ressemblent à de petits pèse-personne, mais sont bien plus précis. Nous avons relié chacun d'eux à un amplificateur de charge comportant un affichage et l'avons fixé au bout d'une perche en plastique. Nous avons aussi matelassé les dispositifs obtenus à l'aide d'épaisses couches de cuir, afin que les animaux aient leurs sensations habituelles de morsure et afin de ne pas endommager leurs dents. Ce détail devait se révéler plus important qu'anticipé, l'un de mes collègues ayant depuis montré que les crocodiliens ne mordent de toute leur force que si leurs dents viennent au contact d'un matériau qui n'est pas trop dur.

Une fois notre dispositif de mesure au point, il restait à établir un protocole d'étude. Aussi me suis-je associé avec les praticiens des crocodiles que sont Kent Vliet et John Brueggen, directeur

À MASSE ÉGALE, MORSURE ÉGALE

Les crocodiliens peuvent avoir des tailles variables et des museaux très différents. Les spécialistes pensaient que ceux dont les museaux sont fins mordaient moins fort que ceux dont les museaux sont puissants, mais les mesures révèlent que tous ont la même force de morsure, si on la ramène à une même masse corporelle. Cette force, d'intensité impressionnante, est proportionnelle à la masse du crocodilien. Cette relation de proportionnalité permet de calculer les forces de morsure de crocodiliens éteints, tel *Sarcosuchus*, dont le corps mesurait plus de 12 mètres.



du Parc de Saint Augustine, pour concevoir une façon d'atteindre nos objectifs de recherche sans trop stresser les animaux. Le plan que nous avons élaboré, et qui a fonctionné d'emblée, consiste à attraper les animaux au lasso dans leur enclos, à les transporter à l'extérieur de façon sûre par un groupe de personnes, à libérer ensuite leurs mâchoires qui, invariablement, s'ouvrent alors, et enfin à placer le capteur entre leurs dents postérieures (l'équivalent des molaires), là où les forces de morsure sont maximales.

Pendant tout ce processus, un dresseur doit se tenir sur le dos de l'animal et maintenir sa tête droite afin d'éviter qu'il ne tente de se rouler. Si l'animal y parvenait, le résultat de la mesure risquerait de ne pas refléter la seule contribution des muscles de la mâchoire: les forces supplémentaires que le corps massif du reptile appliquerait alors sur le capteur fausseraient la mesure.

Nous prévoyions aussi de peser chaque animal et mesurer sa longueur, ce qui n'est que rarement fait lorsqu'on étudie de gros animaux

▼ sauvages. Nous pensions en effet qu'il serait important, quelle que soit la taille d'un crocodilien, de rapporter la force de morsure mesurée à la masse de l'animal, car cela nous permettrait de faire des comparaisons avec les forces mesurées sur d'autres espèces, quelle que soit la forme de leurs corps.

L'ensemble du processus revient en quelque sorte à faire du rodéo sur taureau, sauf qu'un professionnel de ce sport à qui j'en parlais m'a dit ne vouloir en aucun cas essayer, car les « taureaux, au moins, ne reviennent pas vous dévorer ». Il m'est arrivé aussi de maîtriser et mesurer la force de morsure d'un alligator de quatre mètres en compagnie de George Saint-Pierre, un Québécois qui, aux États-Unis, passe pour le plus grand spécialiste du combat libre de tous les temps. Or George a ensuite déclaré que nous étions des fous et qu'il avait vécu là l'expérience la plus effrayante de sa vie!

En fait, ceux qui travaillent étroitement avec des crocodiles ne les trouvent pas particulièrement dangereux. Cependant, les croco-

communément que la force de morsure reflète de façon fiable l'efficacité de prédation d'un animal muni de dents. Il ne s'agit toutefois que d'une indication indirecte de quelque chose qui n'est pas directement mesurable (ici l'efficacité prédatrice). Afin de juger de l'efficacité avec laquelle un crocodilien chassera avec succès les proies qu'il rencontre à l'interface terre-eau, le paramètre biologique le plus pertinent dans notre cas est la pression dentaire. Cette grandeur indique si les dents peuvent vraiment pénétrer dans la chair, c'est-à-dire dans un bloc composé de peau, de cuticule, de coquille, d'os, etc. Les pressions exercées par les couronnes dentaires (la partie de la dent qui dépasse de la gencive) cisailent les tissus et y créent des fissures ou des perforations, qui s'ouvrent d'autant plus que la force de morsure est élevée. Un crocodilien peut ainsi soit mettre immédiatement à mort une proie, soit s'assurer une prise solide afin de la noyer.

DES MOULAGES POUR ESTIMER LA PRESSION EXERCÉE PAR LES DENTS

Pour estimer la pression dentaire après chaque prise de mesure de la force de morsure, nous glissons une planche entre les mâchoires de l'animal, que nous maintenions fermées. J'en profitais pour prélever une empreinte des dents à l'aide de mastic dentaire. La planche bloque tout réflexe de morsure que pourrait avoir le crocodile en réaction au contact de ses dents avec un matériau, mes mains par exemple... Mais même après avoir réalisé des centaines de moulages dentaires, l'idée d'avoir à en faire encore un me fait frémir: mettre ses mains dans la gueule d'un crocodile est en effet contraire à l'instinct le plus élémentaire!

Une fois au laboratoire, nous tirions des empreintes obtenues des moules des dents, puis de ces derniers les superficies de contact de leurs pointes. En divisant la force de morsure par les valeurs obtenues, nous en déduisions les pressions dentaires.

Ce que nous avons appris au cours de l'étude de plus de 500 individus, représentant toutes les espèces de crocodiliens actuels, remet en cause une partie des connaissances admises sur ces animaux. Auparavant, les spécialistes de ces animaux prédisaient des différences importantes entre les forces de morsure de diverses espèces crocodiliennes. Les animaux dotés de museaux fins, de fines dents et qui se nourrissent de proies tendres telles que les poissons étaient supposés mordre avec des forces assez faibles, tandis que ceux munis de crânes massifs et de dents capables de broyer os et coquilles étaient censés mordre avec des forces élevées.

Au lieu de cela, nous avons constaté que tous les crocodiliens peuvent mordre très fortement. Nos chiffres révèlent que, à l'exception



L'auteur, Gregory Erickson, en train de mesurer la force de morsure d'un alligator.

diles les plus imposants nous arrêtent un peu, et même un petit crocodile peut vous arracher le bras si vous ne faites pas assez attention. Comme les vétérinaires avec les chiens, nous avons appris à lire le comportement d'un crocodilien et à le manipuler sans lui faire de mal et sans qu'il en fasse. Les règles fondamentales sont de se tenir à distance des extrémités pointues et d'éviter d'être au bord de l'eau. Les crocodiliens sont en effet extrêmement furtifs; même un crocodile de cinq mètres de long peut passer inaperçu dans une eau peu profonde et en jaillir brutalement pour vous attaquer...

La mise au point de notre protocole de mesure exigeait de régler la question de l'interprétation des données. On considère

du gavial, qui est piscivore, les crocodiliens présentent les mêmes forces de morsure par unité de masse corporelle, indépendamment du régime alimentaire et de la grosseur du museau. Les forces de morsure les plus élevées de notre échantillon vont jusqu'à 1 700 kilogrammes environ (les forces sont exprimées ici en unités de masse, un kilogramme équivalant à 9,81 newtons, son poids sur Terre). Ces valeurs éclipsent complètement celles mesurées chez certains mammifères carnivores tels que la hyène tachetée (environ 630 kilogrammes), le lion et le tigre (environ 450 kilogrammes). À titre de comparaison, les forces de morsure d'un humain atteignent seulement 90 kilogrammes. On me demande souvent si l'on peut s'extraire des mâchoires d'un crocodile ou d'un alligator. La force de morsure d'un grand crocodilien équivaut au poids d'une voiture, de sorte que je réponds que pour s'en sortir, il faut être capable de soulever une voiture...

Tous les biologistes connaisseurs des crocodiliens avec qui j'avais discuté avant de mener ces travaux affirmaient que les alligators sauvages – très vifs et tout en dents et griffes, car ils doivent lutter pour survivre – mordaient avec une force supérieure à celle de leurs congénères en captivité, souvent obèses et léthargiques. Au lieu de cela, nous avons découvert qu'à poids égal, ils serrent tous leurs mâchoires avec la même puissance. Cette constatation a l'intérêt de montrer que l'on peut utiliser les données obtenues sur les animaux en captivité pour estimer les performances des crocodiliens sauvages et celles des formes fossiles.

Lorsque nous avons extrapolé nos résultats pour estimer la force de morsure de *Sarcosuchus* et de certains crocodiliens géants du passé, nous avons trouvé des valeurs tournant autour de 10 000 kilogrammes, soit le poids d'un petit camion. À l'autre extrémité du spectre, nous avons aussi estimé la force de morsure de *Procaimanoidea*, un crocodilien de seulement 0,75 mètre de long qui vivait il y a quelque 40 millions d'années; nous avons trouvé 64 kilogrammes. Mon ancien doctorant, Paul Gignac, aujourd'hui maître de conférences à l'université d'État de l'Oklahoma, s'est servi de ces données pour évaluer la force de morsure des crocodiliens au cours de leur évolution.

UNE MÊME ARCHITECTURE MUSCULAIRE DEPUIS 85 MILLIONS D'ANNÉES

Nos trouvailles ont plusieurs conséquences concernant l'évolution des crocodiliens. Elles montrent d'abord que tout au long des 85 millions d'années de leur domination, ces gardiens des rives ont conservé la même architecture des muscles fermant les mâchoires. Elles conduisent aussi à une

nouvelle vision de la façon dont les crocodiliens ont, à plusieurs reprises, acquis les cinq formes principales de museau et de dents et les habitudes écologiques associées. On pourrait comparer les crocodiliens à des cisailles à gazon: si l'on souhaite disposer dans son jardin de plus de puissance, il suffira de passer à un modèle à plus gros moteur. De même, chaque fois que c'était avantageux dans un milieu donné, les crocodiliens ont acquis de

Les pressions dentaires des crocodiliens sont sans égales chez les autres animaux actuels

plus grandes tailles. Pour passer de la coupe d'herbe à des usages plus spécialisés comme la taille d'une haie ou l'élagage d'un arbre, il s'agit de changer d'outil coupeur. De même, les crocodiliens ont pu se spécialiser sur différentes proies grâce à la modification de leurs mâchoires et leurs dents.

Les pressions dentaires mesurées complètent cette vision. Comme les forces de morsure, les pressions dentaires des crocodiliens sont sans égales chez les autres animaux actuels, et elles augmentent avec la taille. Les valeurs trouvées varient entre 1 400 et 25 100 kilogrammes par centimètre carré, ce qui pulvérise le précédent record, à savoir 1 490 kilogrammes par centimètre carré chez *Dunkleosteus*, un poisson fossile géant. Nos résultats suggèrent que les régimes «généralistes» qui ont fait le succès des crocodiliens (aucun n'a de régime strictement spécialisé) ont été possibles du fait qu'ils sont tous capables de croquer les organismes vivant dans leurs environnements. Les différentes formes de dents rendent simplement possibles de plus ou moins grandes pressions en fonction du degré de spécialisation d'une espèce, ce qui augmente son efficacité de prédation sur les proies à chair tendre, tels les poissons, ou au contraire dures, tels les coquillages.

Sachant cela, mes étudiants et moi avons commencé à examiner de plus près les facteurs contribuant à la force de morsure. En 2010, Paul Gignac a étudié les muscles d'alligators >

américains pour mettre au point un moyen de prédire avec précision la contribution de chaque muscle aux forces de morsure. Tous les crocodiliens ont ce qui apparaît au premier coup d'œil comme étant des muscles du cou protubérants. Il s'agit des muscles dits ptérygoïdes médians, qui font partie des muscles impliqués dans la fermeture des mâchoires. Chez la plupart des animaux, les ptérygoïdes médians sont petits et n'apportent que peu de force. Chez les crocodiliens, ils engendrent 60% de la force de morsure.

Les animaux capables de mordre fortement ont en général des muscles temporaux élargis, au-dessus des mâchoires. Situés sur la tempe, les muscles temporaux deviennent saillants quand nous mordons. Chez les crocodiliens, en revanche, ce sont plutôt les ptérygoïdes médians, situés sous les mâchoires et émergeant en bas des côtés du cou, qui se sont renforcés. Pourquoi? La réponse est liée à la façon de chasser des crocodiles, qui sont remarquablement doués pour s'approcher furtivement de leur proie et la saisir dans les eaux peu profondes proches de la rive. En général, lors de leur approche, seule une petite partie de leur tête émerge, qui ne comprend que les narines pour respirer, les yeux pour voir et les

oreilles pour entendre. Le reste du corps de ces géants reste immergé jusqu'à ce que le prédateur jaillisse sur la proie. Or s'ils avaient développé des muscles temporaux puissants sur les côtés de la tête, les crocodiliens auraient été moins furtifs qu'ils ne le sont avec des adducteurs des mâchoires puissants, mais cachés sous l'eau.

Les études menées par Paul Gignac sur les muscles impliqués dans la force de morsure des crocodiles répondent à une question. Dans nos expériences initiales, le gavia, un mangeur de poissons au museau étroit et aux dents fines très pointues, présentait des forces de morsure aberrantes. Ces forces n'étaient que de l'ordre de la moitié de ce qui est normal chez un crocodile. Paul Gignac a disséqué un gavia et découvert que ses ptérygoïdes médians étaient relativement petits, mais que les muscles fermant la mâchoire supérieure étaient relativement gros pour un crocodilien. Cette disposition favorise la vitesse de fermeture de la mâchoire au détriment de la force de morsure. Nous pensons que le gavia, l'espèce de crocodiliens la plus piscivore, a sacrifié la force de morsure au bénéfice de la vitesse, nécessaire pour saisir des poissons.

Le gnou n'a pas vu venir l'attaque du crocodile dissimulé sous l'eau, seuls les yeux, les ouïes et les narines surnageant. Le grand prédateur a raté sa proie. S'il avait réussi, il aurait lutté pour l'entraîner sous l'eau. Les attaques de crocodiles sont si vives que la plupart des animaux et des humains ne parviennent pas à réagir à temps. Plusieurs centaines de personnes en meurent chaque année en Afrique et en Asie du Sud-Est.



Nos recherches résolvent encore une autre énigme concernant les crocodiliens. Lors de nos mesures de la force de morsure du grand crocodile marin australien, nous avons constaté que les mâchoires de l'animal res-

La pression exercée par les dents du *T. rex* aurait atteint 30 tonnes par centimètre carré

taient resserrées sur le capteur dix minutes durant. Et que lorsqu'on faisait bouger le capteur, l'animal resserrait ses mâchoires avec presque la même intensité que pour la morsure initiale. J'ai personnellement constaté à 22 reprises de tels serrages, et attendu jusqu'à 25 minutes avant de pouvoir récupérer l'équipement – quand le crocodile daigne bien le rendre... Cela nous a conduits à nous interroger sur la signification de ce serrage et sur la façon dont il se produit.

À cette fin, nous avons raccordé un ordinateur à notre appareil de mesure de force de morsure et enregistré la force de serrage tout au long de mesures sur des alligators américains sauvages. Cette série de mesures a montré que les forces de serrage ne valaient qu'environ 10% des forces de morsure maximales. Nous estimons que ce comportement est lié à la façon dont les alligators noient les grandes proies. Dans la nature, les alligators mordent en général fortement leur gibier pour le transpercer puis, la prise étant assurée par les dents, réduisent l'effort et emportent la proie dans des eaux plus profondes pour la noyer. Si elle se débat, les alligators remordent à pleine force.

Les dissections effectuées par Paul Gignac ont révélé que ces capacités de prise et de serrage proviennent d'une remarquable spécialisation physiologique des muscles. Ce chercheur a noté que les puissants muscles refermant les mâchoires sont de couleur blanche, analogues aux muscles pectoraux de la dinde, lesquels peuvent engendrer un effort de courte durée pour le vol, mais s'épuisent rapidement par manque d'approvisionnement en sang. Il découvrit ensuite des muscles rouges et roses permettant en revanche d'assurer une prise durable à faible force. Ils sont

apparentés à la chair foncée trouvée dans les pattes de la dinde, qui sont fortement vascularisées et riches en myoglobine, ce qui rend possible une marche soutenue. Le modèle de Paul Gignac montre que ces muscles foncés non remarqués auparavant engendrent 10% de la force de morsure, juste assez pour garder les dents engagées dans la proie.

Nos travaux peuvent par ailleurs aider à comprendre l'alimentation d'autres animaux que les crocodiliens. Paul Gignac et moi avons utilisé nos résultats afin de mettre au point le premier modèle fiable de la force de morsure du tyrannosaure, *Tyrannosaurus rex*. Les estimations précédentes de la force de morsure de *T. rex* résultaient de modèles fondés sur des alligators, des lézards ou même des mammifères. Les résultats étaient disparates puisqu'ils variaient entre 8200 et 111200 kilogrammes. En revanche, notre modèle, qui est spécifique aux archosaures (le groupe comprenant les crocodiliens, les oiseaux et leurs parents éteints) a donné une valeur d'environ 3600 kilogrammes. C'est le double de ce que peuvent fournir les plus grands crocodiliens actuels. La pression dentaire du *T. rex*, qui atteindrait environ 30000 kilogrammes par centimètre carré, est en outre la plus forte pression jamais estimée chez un animal.

COMMENT LE TYRANNOSAURE PULVÉRISAIT LES OS DE SES PROIES

Ces nouvelles estimations, publiées en 2017, ont résolu la question sur la façon dont, comme l'indiquent les preuves fossiles, ce dinosaure emblématique pulvérisait les os de ses proies. Aujourd'hui, seuls les mammifères carnivores dont les dents supérieures et inférieures viennent en contact complet (occlusion) lors de la mastication peuvent accomplir un tel exploit.

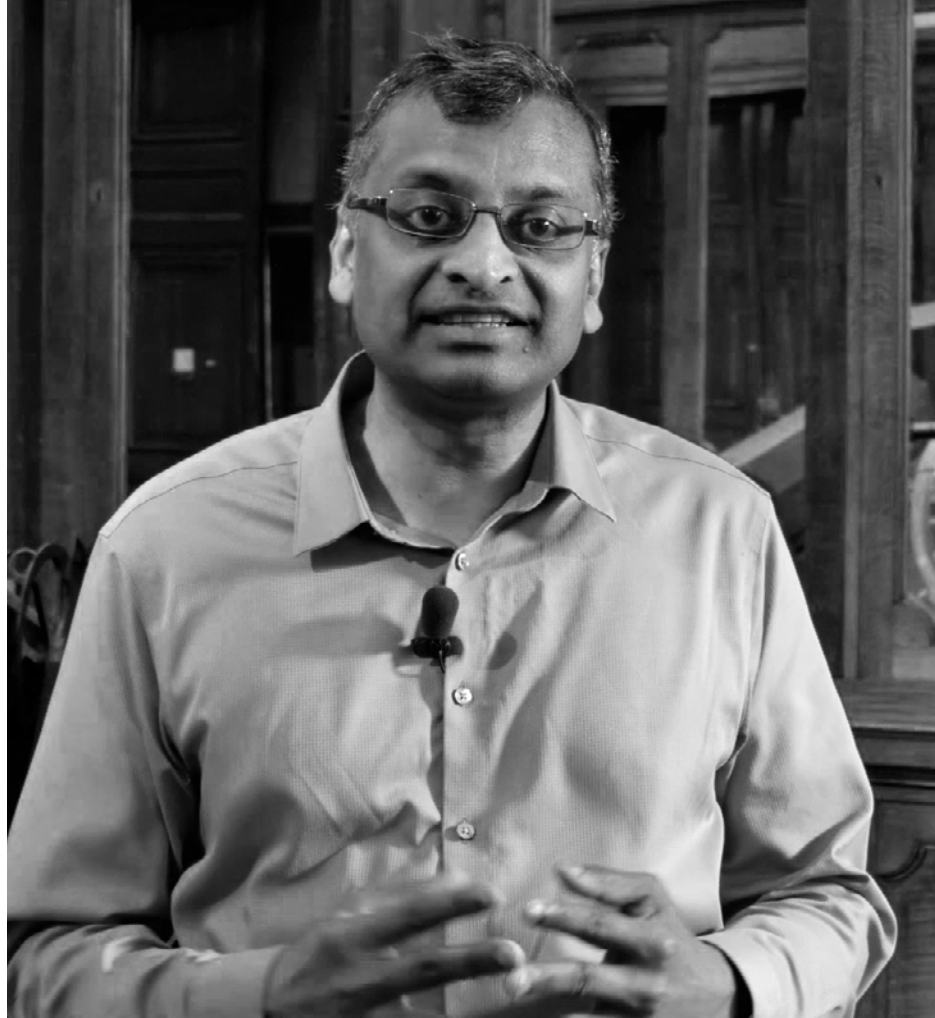
Si nous avons beaucoup progressé dans la compréhension du succès évolutif des crocodiliens, de nombreuses questions subsistent. Par exemple, il est possible que l'influence de la forme de leur museau sur la force de morsure diffère sous l'eau. Un point dont l'étude impliquera de répéter nos expériences, ce qui est plus facile à écrire qu'à faire: il nous faudra mettre au point de nouveaux appareils de mesure fonctionnant en milieu aquatique et nous associer à des ingénieurs pour comprendre comment l'écoulement de l'eau pourrait jouer sur la vitesse de fermeture des mâchoires et la force de morsure. Bien entendu, il nous faudra aussi mettre au point de nouveaux protocoles de sécurité en n'oubliant pas que, sous l'eau, les crocodiliens sont dans leur élément et qu'ils sont donc plus dangereux. Nous allons y arriver, même si cela nous demandera sans doute beaucoup de temps et d'efforts. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. M. Gignac et G. M. Erickson, **The biomechanics behind extreme osteophagy in *Tyrannosaurus rex***, *Scientific Reports*, vol. 7, article 2012, 2017.

G. M. Erickson et al., **Insights into the ecology and evolutionary success of Crocodilians revealed through bite-force and tooth-pressure experimentation**, *PLoS One*, vol. 7(3), article e31781, 2012.

**ALAIN
DORESSOUDIRAM**
est astrophysicien au
Laboratoire d'études spatiales
et d'instrumentation
en astrophysique (Lesia)
de l'Observatoire de Paris.
Il est responsable d'un
des instruments scientifiques
de la mission *BepiColombo*.



Mercure est bien loin d'être une Lune-bis

Le lancement de la mission spatiale *BepiColombo* est prévu pour ce mois d'octobre ou de novembre. Objectif : la planète Mercure, autour de laquelle les deux sondes embarquées se mettront en orbite en 2025. À quelles questions cette mission, la troisième seulement à visiter la planète la plus proche du Soleil, va-t-elle répondre ? Les explications de l'astrophysicien Alain Doressoundiram.

De toutes les planètes rocheuses du Système solaire, Mercure est celle qui a été la moins visitée. Pourquoi ?

Jusqu'à présent, seules deux sondes ont survolé Mercure: *Mariner 10* entre 1974 et 1975, puis *Messenger* entre 2011 et 2015. *BepiColombo* sera donc la troisième sonde à visiter la planète la plus proche du Soleil. La première raison à cette rareté des explorations est qu'on a longtemps pensé que Mercure était juste une « Lune-bis », donc un corps *a priori* pas très intéressant. On sait maintenant que c'est tout le contraire: Mercure est très surprenante.

La seconde raison est technique. Même si Mercure est à environ 60 millions de kilomètres du Soleil et qu'elle n'est donc *a priori* pas si lointaine de la Terre (laquelle est à peine 2,5 fois plus distante de l'astre du jour), envoyer une sonde pour la mettre en orbite autour de Mercure demande beaucoup d'énergie. C'est donc une mission coûteuse, comparable aux missions qui explorent les parties externes du Système solaire.

Pourquoi faut-il beaucoup d'énergie ?

Lorsqu'elle se rapproche du Soleil, la sonde gagne en vitesse, puisqu'elle tombe vers l'étoile. Il faut donc freiner pour réduire la vitesse à environ 13 kilomètres par seconde, de façon que la sonde soit capturée par la gravité de Mercure. Et pour freiner, il faut de l'énergie. On pourrait utiliser des systèmes de propulsion classiques avec du carburant. Mais cela coûterait beaucoup trop cher, sachant que le carburant représente une grande part de la masse de la sonde au moment du décollage.

Quelle est donc la solution ?

Pour freiner, on adopte une autre approche: l'assistance gravitationnelle. Le parcours de la sonde est calculé de telle sorte qu'elle frôle une planète et mette à profit son champ gravitationnel afin de gagner ou perdre de la vitesse (selon la façon dont on s'approche de la planète). C'est une stratégie très utilisée dans l'exploration du Système solaire. Par exemple, la sonde *Rosetta* a profité de plusieurs assistances gravitationnelles pour atteindre la comète Tchouri après plus de dix ans de voyage. Avec neuf assistances gravitationnelles (un survol de la Terre, deux de Vénus et six de Mercure elle-même avant la mise en orbite), *BepiColombo* établit un record; cela explique aussi pourquoi la sonde mettra sept ans pour arriver à destination.

Pourquoi la mission BepiColombo a-t-elle été nommée ainsi ?

En hommage justement au scientifique italien Giuseppe « Bepi » Colombo, un spécialiste de l'assistance gravitationnelle. Il avait conçu la trajectoire de la sonde *Mariner 10*, qui a ainsi effectué trois survols de Mercure au lieu d'un grâce à l'assistance gravitationnelle. Ce

chercheur a aussi expliqué la résonance gravitationnelle particulière de Mercure, notée 3:2. La planète réalise trois tours sur elle-même (le jour mercurien dure 58,6 jours terrestres) en exactement deux révolutions autour du Soleil (une année mercurienne dure 88 jours terrestres). Ce phénomène s'explique par la proximité de Mercure au Soleil et les forces de marée qu'exerce l'étoile sur la planète. C'est le même mécanisme qui fait que la Lune présente toujours la même face à la Terre: notre satellite tourne sur lui-même en un temps exactement égal à celui qu'il lui faut pour faire un tour complet autour de la Terre.

Pourquoi pensait-on que Mercure était similaire à la Lune et donc d'un intérêt limité ?

Les premières images de la surface de Mercure, prises par *Mariner 10*, ont montré qu'elle est couverte de cratères d'impact. Quelque chose donc de très similaire à la Lune. Et par certains aspects, Mercure était même moins palpitante. Par exemple, on n'observait aucune trace d'activité volcanique actuelle ou passée, alors que les mers lunaires sont d'anciens bassins remplis de magma qui s'est refroidi. Mercure semblait donc assez inerte et bien moins intéressante que Mars, Vénus ou les géantes gazeuses.

Le seul point dans les observations de *Mariner 10* qui suscitait un peu de curiosité était la présence d'un champ magnétique planétaire. Son intensité était estimée à environ 1,1% de celle du champ magnétique terrestre. C'est suffisant pour dévier le vent solaire (le flux d'ions et d'électrons éjectés par la haute atmosphère du Soleil) et constituer une magnétosphère. Mais les données de la sonde étaient insuffisantes pour dire s'il s'agissait d'un champ rémanent, c'est-à-dire un champ magnétique qui aurait été préservé lors de la solidification de roche fondue, ou d'un champ magnétique actif.

Finalement, c'est un peu pour toutes ces raisons, coût de la mission et faible intérêt scientifique, qu'il a fallu attendre plus de trente ans pour qu'une nouvelle sonde, *Messenger*, aborde Mercure.

Et les observations de Messenger ont créé la surprise ?

À plus d'un titre! Les résultats des sept instruments scientifiques embarqués sur *Messenger* ont soulevé de nombreuses questions. L'une des plus importantes concerne le champ magnétique. La sonde a confirmé que le champ de Mercure est actif et qu'il est de même nature que celui de la Terre. Cela signifie qu'il est créé par un noyau de fer liquide dont les mouvements de rotation, de convection et de turbulence engendrent un effet dynamo. Or cette observation pose des questions. Pourquoi la Terre et Mercure ont-elles un champ magnétique alors

que Mars et Vénus n'en ont pas ou plus? Pour Vénus, la raison est probablement liée à sa faible vitesse de rotation. Pour Mars, c'est son refroidissement. La chaleur accumulée lors de sa formation s'est dissipée dans l'espace sous la forme de rayonnement infrarouge, et la différence de température entre le centre de la planète et sa surface est aujourd'hui insuffisante pour entraîner des mouvements de convection dans le noyau de fer. Or le temps de refroidissement est proportionnel au rayon de la planète, ce qui explique pourquoi Mars a perdu son champ magnétique et pas la Terre, qui est plus grosse. Mais comme Mercure est encore plus petite que Mars, on ne comprend pas pourquoi l'effet dynamo y subsiste encore.

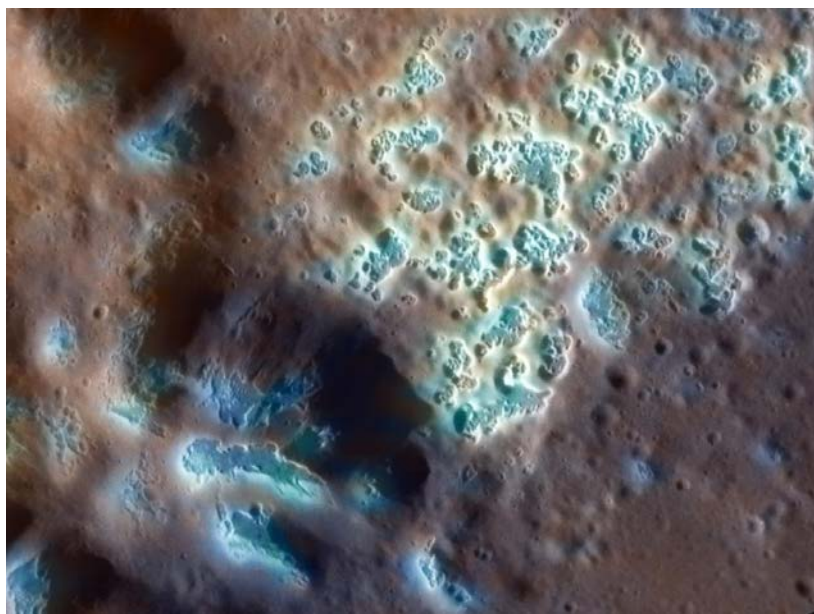
Que sait-on de la structure interne de Mercure?

À partir des données sur la masse de la planète et son diamètre, les scientifiques ont montré que c'est l'un des corps les plus denses du Système solaire. À titre de comparaison, Ganymède, une lune de Jupiter, est de taille comparable à Mercure alors que sa masse est deux fois moindre.

Pour expliquer une telle densité, le noyau de fer mercurien (plus lourd que la roche du manteau et de la croûte) doit représenter 60% de la masse totale de la planète. Le reste est constitué du manteau, d'environ 400 kilomètres d'épaisseur, et d'une croûte, épaisse de 50 kilomètres (sur un rayon total de 2440 kilomètres). Or pour la Terre ou Mars, le noyau de fer ne représente qu'environ 30% de la masse totale.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer cette structure surprenante. Mercure aurait eu une masse deux fois plus importante, mais une collision avec un planétésimal aurait pulvérisé une partie de son enveloppe rocheuse

Ces dépressions irrégulières (en bleu) à la surface de Mercure sont nommées *hollows* (« creux » en anglais). Leur nature est encore inconnue. Il est possible qu'elles continuent de se former aujourd'hui, auquel cas la surface de Mercure est loin d'être aussi inerte qu'on ne le pensait.



en laissant le noyau intact. Autre solution: lors de sa naissance dans la nébuleuse de gaz et de poussière du Soleil en formation, la planète se serait formée dans une région pauvre en matériau rocheux. Ce dernier aurait été repoussé au loin par la chaleur de la protoétoile, laissant une majorité d'éléments lourds tels que le fer. Il reste à départager ces scénarios. D'autant plus que, pour l'instant, les modèles de formation des planètes n'expliquent pas les propriétés de Mercure. Cette dernière est un peu le chaînon manquant de la planétologie. Nous avons besoin de mieux comprendre Mercure pour affiner nos modèles. Par la même occasion, nous en saurons alors plus sur la formation de la Terre et des planètes extrasolaires.

Le gros noyau de fer est-il la seule particularité de la structure de Mercure?

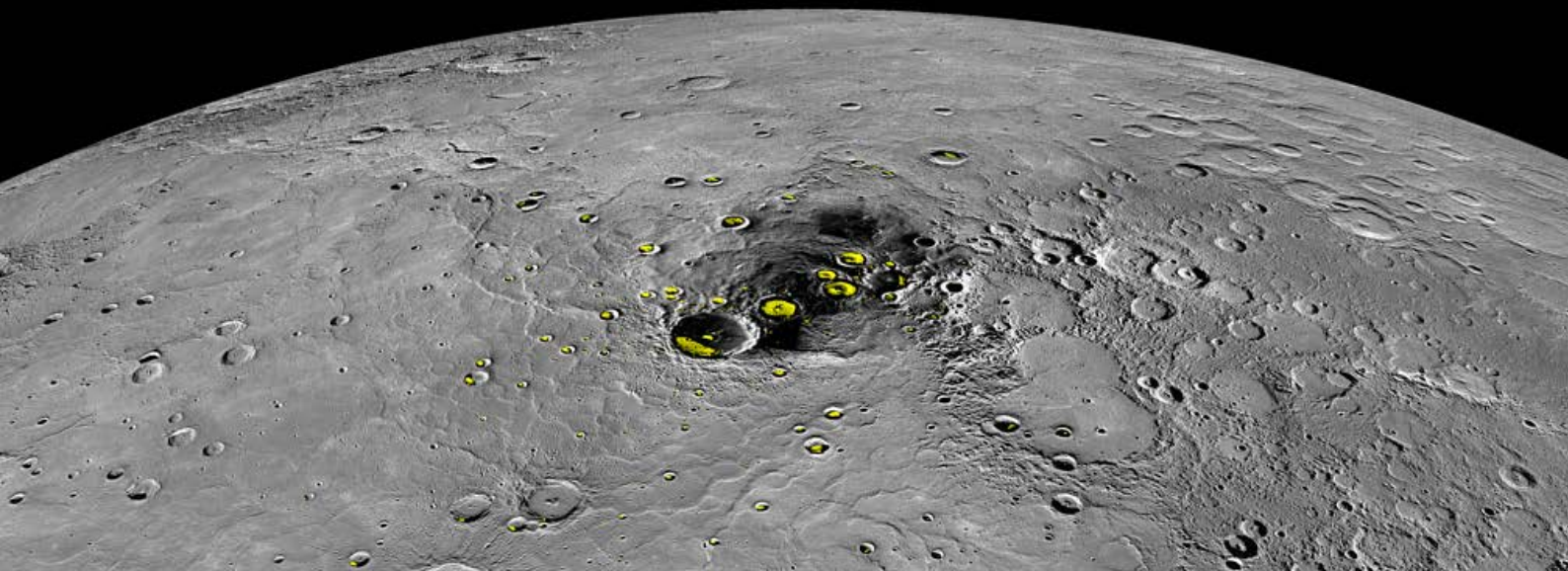
Si l'intérieur de Mercure est très riche en fer, à l'inverse, sa surface est très pauvre en éléments lourds, bien plus pauvre que la Lune par exemple. Là encore, nous n'avons pas d'explication. Et pour rajouter au paradoxe, la surface est riche en éléments volatils. Ces éléments légers devraient *a priori* s'échapper facilement de la planète; or ils sont toujours là sur Mercure, exposée au vent solaire et où la température peut monter jusqu'à 430 °C.

Autre différence avec la Lune, la surface de Mercure est deux fois plus sombre. On suppose qu'elle est recouverte d'une couche riche en carbone dont l'origine fait débat. Cette couche est peut-être due à la chute de météorites riches en carbone après la formation de la croûte. Mais elle pourrait aussi être plus ancienne: quand la surface de la planète en formation était recouverte d'un océan de magma, le carbone aurait flotté à la surface et y serait resté lorsque cet océan s'est refroidi et solidifié.

Vous indiquiez que *Mariner 10* n'avait pas détecté de traces de volcanisme sur Mercure. Cette inactivité a-t-elle été confirmée?

Non, au contraire. Dans les années 1990, grâce à de nouveaux outils d'analyse, Mark Robinson, de l'université d'État de l'Arizona, et Paul Lucey, de l'université d'Hawaï, ont décelé des plaines relativement lisses à la surface de la planète. En montrant que ces régions avaient une composition différente du reste de la surface, provenant probablement de matériaux de l'intérieur de la planète, ils ont montré que Mercure a eu une activité volcanique. D'après les données de *Messenger*, ce volcanisme aurait été de type explosif, à l'image du mont Saint Helens, et non effusif comme les volcans d'Hawaï, par exemple.

L'activité volcanique semble avoir duré assez longtemps, mais nous n'avons pas une chronologie précise de l'histoire géologique de



Le radiotélescope d'Arecibo a détecté des zones très réfléchissantes (en jaune) au fond des cratères d'impact situés aux pôles de Mercure. Privées en permanence de la lumière directe du soleil, ces dépressions sont très froides et pourraient ainsi contenir de la glace d'eau.

la planète. Autre témoignage de ce passé, la sonde *Messenger* a observé ce qu'on nomme des escarpements lobés. Ces failles peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres de long et présenter un dénivelé de un à deux kilomètres. On en trouve ailleurs dans le Système solaire, sur la Lune par exemple, mais pas aussi importantes que sur Mercure. Ces failles sont le résultat d'une contraction brutale lors du refroidissement de Mercure. Le rayon de la planète aurait diminué d'une dizaine de kilomètres en peu de temps. La croûte n'aurait pas suivi le mouvement assez vite et se serait craquelée sous les contraintes mécaniques.

Encore une fois, nous n'avons pas davantage de précisions sur les échelles de temps de cette contraction. L'un des objectifs de *BepiColombo* est de photographier en détail ces escarpements lobés afin de tenter de reconstruire l'histoire géologique de la planète.

Y a-t-il d'autres structures étonnantes que *BepiColombo* pourra étudier ?

Deux autres éléments de la surface de Mercure nous intéressent particulièrement. Le premier concerne la région des pôles. Il y existe des endroits qui ne sont jamais éclairés par le Soleil. En effet, l'inclinaison de la planète est nulle, c'est-à-dire que son axe de rotation est bien perpendiculaire au plan de l'orbite (contrairement à la Terre, dont l'axe Nord-Sud penche de 23,5 degrés). Il n'y a donc pas de saisons sur Mercure. Par conséquent, le fond des cratères d'impact situés aux pôles ne voit jamais la lumière du jour. Il est à peine réchauffé par les parois rocheuses et la température y est très basse, environ -230°C . Il y fait donc plus froid que du côté nuit de la planète, où la température descend jusqu'à -180°C à peu près.

Dans les années 1990, le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico, a observé les régions polaires de Mercure. La planète est assez proche de la Terre pour que l'on puisse y

envoyer un signal radio et analyser l'écho qui nous revient. Ces données ont montré que le fond des cratères polaires contient un matériau très réfléchissant (voir l'image ci-dessus). Il pourrait s'agir de glace d'eau, une hypothèse que les instruments de *BepiColombo* pourront confirmer ou infirmer. Si c'est bien de l'eau, elle se serait accumulée pendant des milliards d'années, grâce à l'apport des comètes riches en glace. Il est captivant de se dire qu'il pourrait y avoir de l'eau si proche du Soleil. Ces cratères pourraient être une cible de choix pour une future mission comprenant un atterrisseur.

Et en dehors des régions polaires ?

L'autre particularité de la surface de Mercure qui a attiré notre attention concerne des dépressions irrégulières et peu profondes, nommées *hollows*, des « creux » (voir la photographie page ci-contre). Sur les images en fausses couleurs, elles apparaissent d'un bleu intense, mais elles sont effectivement un peu bleutées et très brillantes. On les connaît depuis *Mariner 10*, mais ce sont les images de *Messenger* qui ont permis d'en répertorier des milliers et d'en voir les détails. Les *hollows* semblent assez jeunes et continuent peut-être à se former aujourd'hui. Ce serait le signe que la surface de Mercure évolue encore et qu'elle n'est pas inerte comme on l'a longtemps pensé. Ces petites structures, à des échelles inférieures au kilomètre (les plus grandes ont un diamètre d'environ 1,6 kilomètre), se trouvent partout à la surface de la planète et surtout dans des cratères d'impact, mais pas uniquement. On en trouve aussi dans les plaines, hors des cratères.

On est loin de comprendre leur formation et leur composition. Il s'agit peut-être d'un matériau souterrain qui s'est retrouvé en surface et qui se serait ensuite sublimé (passant de l'état solide à gazeux), ce qui expliquerait la forme irrégulière des *hollows*.

La sonde européenne **MPO** (*Mercury Planetary Orbiter*), l'une des deux composantes de la mission **BepiColombo**, lors de son arrivée à la base de Kourou, en Guyane.



Quels sont les atouts de *BepiColombo*, par rapport à la mission *Messenger* ?

Messenger a recueilli beaucoup d'informations et révélé la grande singularité de Mercure, qui est loin d'être une « Lune bis » contrairement à ce que l'on pensait au début de l'exploration du Système solaire. Mais les découvertes de *Messenger* ont soulevé beaucoup de questions restées sans réponses. C'est en fait assez normal. *Messenger* était une mission du programme *Discovery* de la Nasa; ces projets dédiés à l'exploration robotisée du Système solaire (à l'exception du satellite *Kepler* spécialisé dans la recherche d'exoplanètes) ont un budget limité à moins de 500 millions de dollars. L'idée était de faire des missions fréquentes, aux objectifs variés et à un coût limité. C'est pourquoi *Messenger* n'avait que sept instruments à son bord – deux caméras, des spectromètres, un altimètre et un magnétomètre.

La sonde *BepiColombo*, dont le budget est presque triple, embarque 16 instruments scientifiques, plus sensibles et plus précis. Ils devraient nous permettre de collecter de nombreuses données et de répondre aux grandes questions sur Mercure, son histoire, sa structure interne, son champ magnétique et son exosphère.

Exosphère? De quoi s'agit-il?

L'atmosphère de Mercure est si ténue que l'on parle plus volontiers d'exosphère. La différence entre une atmosphère et une exosphère est que, dans la seconde, une molécule de gaz a plus de chance de percuter la surface de la planète qu'une autre molécule de gaz. On est typiquement à 10^{-12} bar, soit un millionième de millionième de la pression atmosphérique à la surface de la Terre.

L'exosphère de Mercure contient de l'hydrogène, de l'hélium, de l'oxygène, du sodium, du potassium, du calcium et des traces d'autres éléments. Leur distribution n'est pas homogène et elle varie au cours du temps. Par exemple, on trouve le sodium et le potassium surtout près des pôles et le calcium vers l'équateur.

L'atmosphère primordiale de la planète a probablement été perdue assez rapidement du fait de la faible gravité de la planète, de la température élevée et de l'action du vent solaire. L'exosphère perd son contenu en permanence, mais elle est alimentée par différents processus. L'hydrogène et l'hélium viendraient principalement du vent solaire. Et les autres éléments seraient arrachés à la surface, selon un mécanisme qui reste à préciser: érosion par le vent solaire? Variations thermiques entre les zones éclairées à 430 °C et à l'ombre à -180 °C? Impacts des météorites?

Cette exosphère interagit avec le vent solaire, mais aussi avec la magnétosphère de la planète. Mercure est un système vraiment intéressant pour étudier comment ces différents éléments se comportent les uns avec les autres. Par exemple, le sodium est arraché de l'exosphère par la pression de radiation du Soleil, et forme une queue comparable à celle d'une comète, sur plus de deux millions de kilomètres.

Comment *BepiColombo* étudiera-t-elle l'exosphère et la magnétosphère?

Cette mission est en réalité constituée de deux sondes, fruits d'une collaboration entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et l'Agence spatiale japonaise (Jaxa), ce qui est une première. L'idée était d'avoir deux sondes aux missions complémentaires, avec une stratégie

scientifique et une coordination optimale. Les sondes effectueront le voyage fixées l'une à l'autre et elles se sépareront à l'arrivée en orbite autour de Mercure. La sonde japonaise MMO (*Mercury Magnetospheric Orbiter*), rebaptisée *Mio*, sera placée sur une orbite lointaine et elliptique, à l'extérieur du champ magnétique, tandis que la sonde européenne MPO (*Mercury Planetary Orbiter*) évoluera sur une orbite basse, dans la magnétosphère. Nous aurons ainsi deux points de vue sur le champ magnétique et nous pourrons étudier sa dynamique et voir comment il se comporte face au vent solaire.

La sonde MMO comprend cinq instruments scientifiques : un magnétomètre, un appareil pour étudier la dynamique de la magnétosphère et divers dispositifs pour analyser le contenu en particules et en poussière du milieu entourant la planète.

Quant à la sonde MPO, sa mission s'étend aussi à la compréhension de la surface et de l'intérieur de la planète. Elle est équipée de onze instruments dont un altimètre, un accéléromètre, un magnétomètre, des spectromètres sensibles à différentes gammes de longueurs d'onde et un transpondeur radio.

Mercury a joué un rôle historique dans l'acceptation de la théorie de la relativité générale. La mission BepiColombo comporte-t-elle un volet lié à cette théorie ?

Oui, en effet. Rappelons que la relativité générale d'Einstein fait apparaître la force gravitationnelle comme le résultat d'une déformation de l'espace-temps par des objets massifs. Mercure, par sa proximité au Soleil, y est particulièrement sensible. En expliquant correctement, et surtout quantitativement, pourquoi le périhélie de Mercure (le point de sa trajectoire le plus proche du Soleil) avance à chaque révolution d'une fraction d'angle, Einstein a montré la supériorité de sa théorie sur celle de Newton. La sonde MPO permettra d'en faire un test supplémentaire : grâce à l'accéléromètre très précis dont elle est équipée, nous pourrons mesurer la courbure de l'espace-temps au niveau de l'orbite de Mercure et ainsi détecter un petit écart éventuel aux prédictions de la relativité générale.

A quelles difficultés la conception de la mission BepiColombo s'est-elle heurtée ?

Cette mission, dont la réalisation a été décidée en 2000, est bien connue des spécialistes de l'exploration spatiale pour ses multiples reports. Nous avons dû en effet relever des défis techniques assez importants. En général, lorsqu'on conçoit une sonde, on utilise des dispositifs déjà éprouvés. Or avec *BepiColombo*, seuls 17% des éléments l'étaient ; il a fallu inventer tout le reste.

L'une des raisons est la température élevée près de Mercure. Nous avons développé un

revêtement qui isole la sonde du chaud, mais aussi du froid. Même chose pour les panneaux solaires : les dispositifs utilisés pour les satellites en orbite autour de la Terre ou sur les toits des maisons ne résistent pas aux températures

Seuls 17% des éléments de la sonde BepiColombo étaient de conception éprouvée. Il a fallu inventer tout le reste

mercuriennes. Et pour toute l'électronique des instruments, il a fallu la repenser pour qu'elle soit capable de supporter la température, mais aussi les radiations ambiantes.

Enfin, un autre défi technique était la propulsion. *BepiColombo* utilise un moteur ionique. Les propulseurs classiques sont remplacés par un dispositif qui éjecte à grande vitesse des ions de xénon. Cela ne permet pas de produire des poussées courtes et rapides, mais le moteur opère en continu. Ainsi, en cumulé, on obtient une poussée très élevée. C'est la technique idéale pour l'exploration du Système solaire, voire d'autres systèmes stellaires. La Nasa a déjà testé le moteur ionique avec la sonde *Dawn*, l'ESA seulement avec *Smart-1*, à destination de la Lune. *BepiColombo* est donc, pour l'ESA, la première grande mission utilisant cette propulsion. Et déjà d'autres sont programmées comme *Solar Orbiter*, qui décollera en 2019.

Avez-vous des projets en direction du grand public, en liaison avec BepiColombo ?

La sonde décollera de Kourou, en Guyane, sur une fusée Ariane. Avec des collègues européens et japonais, scientifiques et ingénieurs, nous avons décidé de partager ce moment avec les enfants guyanais au travers du projet « Planètes en Guyane ». L'idée de cette initiative est de visiter les classes pour promouvoir les sciences et l'astronomie, les métiers du spatial, notamment auprès des filles, en insistant aussi sur la dimension internationale de ces projets. Il est primordial d'apporter le goût du savoir au jeune public. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

Site internet de la mission BepiColombo de l'Observatoire de Paris :
<https://www.planete-mercure.fr/>

D. E. Smith et al., Gravity field and internal structure of Mercury from Messenger, Science Express, 2012.

S. Murchie et al., Mercure : une planète dans la fournaise, Pour la Science, n° 402, avril 2011.

R. Vervack et al., Mercury's complex exosphere : results from Messenger's third flyby, Science, vol. 329, pp. 672-675, 2010.

B. Anderson et al., The magnetic field of Mercury, Space Science Reviews, vol. 152, n° 1-4, pp. 307-339, 2010.

B. Denevi et al., The evolution of Mercury's crust : a global perspective from Messenger, Science, vol. 324, pp. 613-618, 2009.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480

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



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

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

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

TOTAL À RÉGLER _____ €

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

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____
Telephone : _____
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire
N° _____
Date d'expiration : _____
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____
Signature obligatoire : _____



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**



Le citoyen, ce scientifique

Quand la production du savoir scientifique se démocratise

Nous avons tous la possibilité, à des degrés divers, de contribuer à l'édification de la science par des programmes de recherche participative. Ces pratiques, de plus en plus nombreuses, s'inscrivent dans une longue tradition, notamment à l'Inra.

« **L**a République n'a pas besoin de savants », aurait clamé le président du Tribunal révolutionnaire qui condamna à la guillotine Antoine Laurent de Lavoisier en 1794. Savant, le père de la chimie moderne l'était, mais plus précisément, était-il un amateur éclairé ? Un scientifique professionnel ? Un expert ? La question est délicate.

Et elle se pose avec encore plus d'acuité aujourd'hui, à l'heure où les sciences et les recherches participatives, dont une définition consensus a été proposée par une Charte adoptée en 2017 (voir page suivante), ont le vent en poupe. De fait, la production des connaissances scientifiques n'est plus l'apanage des seuls professionnels de la recherche scientifique. Nous sommes tous désormais appelés à contribuer à

l'édification de la science, que nous soyons simple citoyen, agriculteur, éleveur, apiculteur, pêcheur... L'étendue de notre participation varie de la collecte de données, par exemple pour signaler que nous avons vu une fleur (voir l'encadré page 51), à la coconstruction du projet scientifique lorsqu'on est paysan pastier et qu'il s'agit de sélectionner de nouvelles variétés de blé dur (voir l'encadré page 52).

Revenons un instant à Lavoisier. Selon l'historien Patrice Bret, du centre Alexandre-Koyré (EHESS) : « Lavoisier témoigne d'un curieux mélange : d'une part, il appartient pleinement à la science officielle de son temps [...]. D'autre part, ne provenant pas du sérail médical qui dominait la chimie académique [...], il avait le regard neuf et fécond qui lui permit de révolutionner une science. »



« Paradoxalement, poursuit l'historien, la rigueur apportée par les chimistes "amateurs-professionnels" a contribué, sinon à isoler la science de la société, du moins à couper la chimie de l'amateurisme mondain, alors même qu'elle fait irruption dans la société par ses applications militaires et industrielles. » Le cas Lavoisier peut s'étendre à toutes les sciences. D'abord, il oblige à clarifier la typologie des acteurs impliqués dans la production de connaissances scientifiques. Ensuite, il illustre le fossé, plus ou moins profond, qui s'est creusé depuis la fin du XVIII^e siècle entre la science et le grand public. Ces deux aspects sont fondamentaux lorsqu'on s'intéresse aux sciences et aux recherches participatives.

UN FOSSÉ SE CREUSE

Selon Volny Fages, de l'École normale supérieure Paris-Saclay, la séparation entre professionnels de la science et amateurs n'a de sens qu'à partir du moment où le processus de professionnalisation est bien enclenché, c'est-à-dire à partir de 1850. Auparavant, seule la dichotomie entre expert et profane serait pertinente, Lavoisier relevant bien sûr du premier cas. Mieux, les amateurs experts étaient bien souvent considérés comme plus légitimes à parler de science, parce qu'ils n'étaient pas payés pour la pratiquer. Ils n'avaient donc pas d'intérêts particuliers à défendre. La question de la participation ne se posait pas : potentiellement, la science était ouverte à tous.

Parallèlement, plusieurs disciplines se bâtissent, ou au moins se déploient plus largement, grâce aux nombreuses contributions d'amateurs. On peut citer l'astronomie, la météorologie, toutes les sciences naturalistes avec les grandes expéditions, la géologie... Durant cet « âge d'or » de la science amateur, la théorisation et la construction des connaissances scientifiques vont de pair avec la collecte de données.

À partir des années 1850, et jusqu'à la fin du XX^e siècle, à mesure qu'elle se professionnalise, la science s'éloigne progressivement du grand public : les savants renforcent leurs institutions, en restreignent l'accès, se construisant des tours d'ivoire, excluant toujours plus les amateurs de la construction des connaissances.

Toutefois, pendant les dernières décennies du XIX^e siècle, on assiste à la montée en puissance et à l'affirmation des sociétés savantes, des académies de province, des clubs... où se côtoient parfois amateurs locaux et professionnels dans des recherches collectives. En outre, on assiste à un engouement public, à une forte demande sociale, pour la science. C'est aussi la grande époque de la vulgarisation, avec la naissance de nombreuses revues *La Science illustrée*, *Le Magasin pittoresque*,

Les sciences et recherches participatives sont des formes de production de connaissances scientifiques auxquelles participent, avec des chercheurs, des acteurs de la société civile, à titre individuel ou collectif, de façon active et délibérée

La Nature... et le succès des ouvrages de Camille Flammarion, Louis Figuier...

Toujours est-il que les institutions scientifiques se referment sur elles-mêmes, l'amateur se retrouve marginalisé et parfois même regardé avec condescendance.

Qu'en est-il à l'Institut national de la recherche agronomique ? Comment les relations entre scientifiques et non-professionnels de la science ont-elles évolué au sein de cet institut qui, dès sa création au sortir de la Seconde Guerre mondiale, a noué des liens étroits entre chercheurs, agriculteurs et éleveurs ?

AU SERVICE DE L'AGRICULTURE

Dès le départ, l'institut est au service du développement de l'agriculture française, et donc proche du monde agricole. Jusqu'aux



Produire en races locales : un enjeu de reconnaissance

Les éleveurs de races bretonnes – bovines, ovines, caprines... – étant soucieux de la valorisation de leurs produits, la Fédération des races de Bretagne a proposé à Nathalie Couix, Anne Lauvie et Jean-Michel Sorba de l'Inra de travailler avec eux sur la qualification de leurs produits (viande, fromages...). Ceux-ci sont associés à une histoire, un patrimoine et plus généralement à un système de valeurs qui ne sauraient être détachés de l'appréciation qu'en ont leurs producteurs et consommateurs. Comment évaluer et valoriser un tel système au-delà de la stricte qualité intrinsèque des produits ? Le travail engagé entre les producteurs et les chercheurs vise à élaborer une démarche et un dispositif permettant la reconnaissance conjointe des produits, des pratiques des éleveurs et leur ancrage au territoire. Plusieurs ateliers participatifs ont été mis en place avec les éleveurs pour identifier les valeurs partagées sur lesquelles fonder ce dispositif. Qu'est-il ressorti de cette première étape ? Des messages forts comme un élevage extensif en plein air, respectueux des animaux et plus largement du vivant, soucieux de la préservation de la biodiversité domestique, des produits souvent transformés à la ferme et ayant une saisonnalité assumée... La réflexion conduite avec les éleveurs porte désormais sur la façon dont ils pourraient sensibiliser et tirer avantage de ces pratiques. Un label ? Une marque ? Un autre dispositif de reconnaissance qui resterait à inventer ?



Une vache Froment du Léon, une race de qualité.



À l'affût des saisons

Arrivée d'oiseaux migrateurs ou de coccinelles, débourrement des bourgeons, changement de couleur des feuilles, floraison... les dates de ces événements sont des indicateurs importants et pertinents sur l'évolution du climat et complètent les données physiques, notamment les relevés de température. Depuis 2006, sur le modèle de ce qui se faisait en Allemagne, en Suisse... Isabelle Chuine, du CNRS, a proposé de créer l'Observatoire des saisons, un réseau de citoyens pour suivre ces phénomènes naturels (on parle de phénologie). La mission est double : sensibiliser au problème du changement climatique et à ses effets sur la biodiversité ; collecter des données à partir desquelles les chercheurs peuvent reconstituer la dynamique de ces effets.

Tela Botanica, le réseau des botanistes francophones, s'est chargé de la communication pour recruter des participants : organisation d'ateliers participatifs, diffusion d'un film montrant l'intérêt de la démarche... Aujourd'hui, on recense plusieurs milliers d'observations par an.

Depuis 2012, Inaki Garcia-de-Cortazar cherche à structurer et harmoniser les protocoles d'observations phénologiques à l'Inra, afin d'insuffler une vision commune du projet à tous les participants et de donner une cohérence à l'ensemble du programme.

En 2017, l'Observatoire des saisons, qui compile annuellement quelque 3000 observations, a rejoint *Tempo*, le réseau national

d'observatoires (citoyens et professionnels) de la phénologie, où l'on s'intéresse également aux plantes, aux animaux ainsi qu'aux microorganismes, notamment les champignons pathogènes. Un premier constat est l'avancée généralisée de certains événements phénologiques, tels le débourrement, la floraison... qui sont plus précoces. Autre observation, les dates de semis sont désormais homogènes partout en France pour certaines cultures, alors qu'auparavant, la différence Nord-Sud était bien marquée.

Un autre terrain prometteur reste à explorer, celui des données cachées dans des tiroirs, par exemple dans des cahiers, de professionnels ou non. Il y aurait là une mine d'or d'informations à récupérer et à analyser ! Avis aux amateurs.



La date de floraison, un indicateur du changement climatique.

années 1980, la principale source de recrutement de l'Inra est les écoles d'ingénieurs agronomes ; ceux-ci, malgré leur grande proximité avec la réalité agricole, mettent en place un modèle dit *top-down*, c'est-à-dire du haut vers le bas : d'une façon simplifiée, on invente à l'Inra, puis on transfère et diffuse vers l'agriculture les innovations qui en résultent.

Ce modèle est au service de la reconstruction de l'agriculture et de sa modernisation indispensable dans la période de pénurie alimentaire de l'après-guerre où la question de l'autonomie alimentaire est devenue un enjeu crucial pour le pays. La Révolution verte s'impose, et avec elle l'emploi généralisé d'intrants chimiques (engrais, produits phytosanitaires) et de variétés améliorées. L'ambition affichée est d'augmenter la productivité agricole pour redonner à la France la stature internationale qu'elle avait perdue.

Ce schéma de fonctionnement s'est ancré encore un peu plus avec l'essor de la biologie moléculaire qui a conquis tous les laboratoires dans les années 1980. Certains n'hésitaient pas à parler de « grande science » ! Comme le précise Pierre-Benoît Joly, de l'Institut francilien recherche, innovation et société (IFRIS) : « on observe à cette époque une grande coupure épistémologique entre ceux qui font de la recherche et ceux qui en bénéficient. »

Pourtant, c'est aussi à cette époque (en 1979) qu'une inflexion a lieu à l'Inra, avec la création du

département SAD (Systèmes Agraires et Développement, à l'origine ; Sciences pour l'Action et le Développement, aujourd'hui), par Jacques Poly, alors directeur général de l'Inra. « Dans ce département, raconte Bernard Hubert, ancien directeur du SAD, la recherche se faisait au plus près du monde agricole et en interaction avec des groupes locaux. Notre action a posé les grands principes et théorisé ce qu'on nomme désormais les recherches participatives (celles-ci regroupent différentes formes de participation, dont celles que nous utilisons fréquemment à l'époque : « recherche action », « recherche clinique », « recherche intervention »...). C'était vraiment une pratique fondée sur la rencontre des régimes de production de connaissances scientifiques et ceux de la pratique, et d'où émergeait l'innovation. De toute façon, ce n'est pas nous qui changeons le monde, mais bien les acteurs du monde ! » Pour lui, ces travaux ont accompagné les résistances qui, en France, ont limité l'uniformisation des races bovines, et ont permis le maintien de plusieurs races (normande, montbéliarde...) encore bien implantées dans leurs régions.

La participation prend alors la forme de recherche-action : des dispositifs conçus pour produire des actions, pour résoudre des problèmes auxquels sont confrontés des acteurs, en l'occurrence les agriculteurs, les éleveurs, etc. L'articulation entre le local et le national y est



Philippe Mauguin
PDG de l'Inra

En quoi les sciences participatives sont-elles importantes à l'Inra ?

P. M. : L'ouverture au monde socioéconomique et aux acteurs non marchands est un pilier de la stratégie scientifique de l'Inra. Notre engagement historique dans les territoires, notamment aux côtés des associations et des professionnels, fait de notre institut un acteur majeur des sciences et recherches participatives en France, avec plus d'une centaine de scientifiques engagés dans ces démarches.

Quelle est leur place aujourd'hui ?

P. M. : L'implication des citoyens et des professionnels dans la recherche agronomique est parfois déterminante. Ainsi, en Alsace, 35 vignerons imaginent avec des chercheurs de nouvelles approches plus économes en pesticides. Le numérique est aussi un formidable allié : par exemple, le programme Citique s'appuie sur 10 000 promeneurs connectés pour comprendre les maladies que les tiques transmettent.

essentielle, de même que le pluralisme des régimes de production de connaissances.

« Quand les acteurs, les agriculteurs, n'adoptent pas les techniques conçues à l'ombre des laboratoires, selon la vision linéaire *top-down*, c'est peut-être parce qu'ils ont de bonnes raisons de le faire ! » résume Pierre-Benoît Joly. L'Inra repose alors sur deux piliers indépendants : d'une part, se positionner sur les grands enjeux de la biologie moléculaire et, d'autre part, garder un lien avec le monde agricole.

Puis vint les années 1990 au cours desquelles l'Inra cherche à se rapprocher de la société : garder l'esprit d'un établissement de recherche dédié à l'acquisition de connaissances, tout en développant une recherche ouverte sur les questions du monde et de la société. Ce changement de cap coïncide avec les préoccupations grandissantes du public quant à l'alimentation, l'environnement et l'agriculture.

LE TOURNANT PARTICIPATIF

Quel que soit le degré d'implication des citoyens ou des non-professionnels de la recherche, les sciences et recherches participatives sont de plus en plus présentes dans les publications scientifiques internationales. Depuis le début des années 2000, la croissance est même exponentielle, comme le montre François Houllier, ancien PDG de l'Inra, dans son rapport sur les sciences participatives en France remis en 2016 aux ministres chargés de l'Éducation nationale et de la Recherche. Il propose dans ce document une classification des sciences et recherches participatives en trois groupes.

Le premier rassemble les démarches de *crowdsourcing*, ou « sciences citoyennes », quand les citoyens, non chercheurs, sont des collecteurs de données (sur les papillons, les chauves-souris, telle ou telle espèce de fleur...). Une démarche considérablement facilitée par l'essor du numérique qui met à disposition des outils simplifiés de recueil et de transfert d'information. Plus encore, ces plateformes numériques sont des interfaces où tous les acteurs, professionnels ou non, peuvent échanger voire construire des communautés.

Un autre groupe est constitué par la Community Based Research, où chercheurs et personnes concernées, par exemple des malades (sida, mucoviscidose, myopathies, asthme, ...), s'associent pour diagnostiquer et résoudre des problèmes.

Enfin, le groupe des « recherches participatives » consiste en des collaborations de chercheurs, de citoyens ou de groupes d'acteurs variés (agriculteurs, éleveurs, forestiers, services de l'État, associations environnementalistes, collectivités territoriales, etc.) qui s'unissent pour coproduire des connaissances scientifiques dans une perspective d'innovation et de transformation sociale.



Pour un meilleur blé dur bio



Un champ de blé dur.

Àu début des années 2000, les producteurs de blé dur bio (pour les pâtes, la semoule...) avaient testé toutes les variétés inscrites au catalogue français des semences. Mais les problèmes restaient entiers : les rendements étaient très faibles et la qualité insuffisante pour espérer bien vendre la production. La filière était en danger. Il fallait réagir. Avec Dominique Desclaux, de l'Inra, les agriculteurs ont eu accès aux anciennes semences gardées en réserve par l'Institut et les ont testées. Hélas, elles se sont révélées très sensibles aux pathogènes. La solution est venue d'un programme de sélection participative lors duquel de nombreux croisements ont été évalués par les paysans. Au bout de quelques années, une variété nouvelle a émergé (LA1823), satisfaisant tous les acteurs. La difficulté a ensuite résidé dans son inscription au catalogue. Les procédures d'homologation n'étaient pas adaptées au bio, mais les choses ont bougé, grâce au programme de l'Inra. Ce dernier a lui aussi évolué, et il se penche désormais sur l'hypersensibilité au gluten. À ce sujet, l'Inra propose à toute personne se déclarant hypersensible de participer à un projet de recherche. Si vous êtes intéressé, merci de prendre contact *via* le site : <http://bit.ly/INRA-Gluten>



Bien manger, bien vivre

Les liens entre l'alimentation et la santé sont nombreux, encore faut-il pouvoir les mettre en évidence. C'est l'objectif de l'étude NutriNet-Santé, pilotée par Serge Hercberg, qui dirige une équipe d'épidémiologistes de la nutrition, sous la tutelle, entre autres, de l'Inra, et plus particulièrement du département d'Alimentation humaine. Le protocole pour les 160 000 participants inclus est simple : répondre chaque mois, *via* Internet, à un questionnaire sur leur alimentation, leur comportement, leur santé... L'ensemble des réponses constitue une base de données gigantesque sur l'alimentation et la santé, qui permet aux chercheurs d'étudier différentes questions : identifier les facteurs de risque de maladies chroniques (cancer, maladies cardiovasculaires, obésité, diabète...), mettre en évidence les effets des aliments ultratransformés sur la santé, étudier les nouveaux comportements alimentaires et leurs déterminants, déterminer le profil psychologique des consommateurs de bio ou d'aliments conventionnels...

Récemment, grâce à ces données, l'équipe a proposé le Nutri-Score (système d'étiquetage nutritionnel à 5 couleurs) et montré qu'il est un bon marqueur de prédictibilité des risques liés à la santé. Le Nutri-Score a depuis été reconnu par l'État.

Sur un corpus représentatif de documents (articles, interventions dans des colloques...), la Community Based Research arrive en tête, très présente aux États-Unis et au Canada, notamment en santé publique. Viennent ensuite les « recherches participatives », présentes notamment dans l'agriculture et la gestion des ressources naturelles. Enfin, le *crowdsourcing* arrive en troisième position dans les publications scientifiques.

Pour Pierre-Benoît Joly, un élément important du « tournant participatif », notamment à l'Inra, fut la controverse sur les OGM à la fin des années 1990. Elle a conforté la création de collectifs participatifs autour des semences paysannes pour sélectionner et concevoir de nouvelles variétés végétales, notamment pour le blé. Des agriculteurs, soutenus pour certains par des chercheurs, ont pris une part active dans ce processus (voir l'encadré page ci-contre, en haut). Leur rôle en sortait renforcé : ils gagnaient en autonomie et en liberté de choix.

D'UNE RÉVOLUTION À L'AUTRE

Ce mouvement a amplifié la réaction aux modèles de recherche prônés par la Révolution verte, et notamment à l'amélioration génétique des animaux et des plantes prise en charge par la recherche publique et privée. Certains milieux paysans, en France et ailleurs, avaient protesté contre cette spécialisation des rôles et rappelé que les agriculteurs ont toujours cherché à améliorer l'adaptation, la productivité, la résistance aux maladies ou à la sécheresse des espèces qu'ils cultivent ou élèvent. De ces revendications émergent, à l'Inra mais aussi au Cirad, quelques équipes de recherche impliquées dans la sélection participative, dont le produit bénéficie des connaissances des scientifiques et des autres parties prenantes (agriculteurs, boulangers, pasteurs...).

Ce mode de fonctionnement dans lequel des agriculteurs participent, sous différentes formes, à des schémas de sélection et de conception de nouvelles variétés végétales, a généré de nouveaux projets de développement, certains étant même soutenus par la Commission européenne.

Ainsi, depuis 2010, dans le cadre du partenariat européen de l'innovation « Productivité et développement durable de l'agriculture », l'accent est mis sur les connaissances des acteurs et leurs besoins. C'est le point de départ pour concevoir des innovations de façon participative ou identifier des pistes de recherche.

L'objectif de cette initiative est de créer plus de 3 000 groupes opérationnels autour de questions diverses (les circuits courts de distribution, des partenariats entre agriculteurs et artisans-boulangers...). Le participatif est présent du début à la fin, et devient un moteur des transformations du monde agricole.

« TOUS CHERCHEURS » À NANCY

Grâce au soutien de la fondation Bettencourt-Schueller, l'association « Tous chercheurs », dont l'objectif est de mettre la recherche scientifique à la portée de tous, a récemment créé en Lorraine trois laboratoires de recherche ouverts au public. Celui de Nancy a été confié à l'Inra et propose à des collégiens et lycéens de s'initier, durant des stages de recherche, aux sciences végétales et forestières et à la microbiologie. Pour en savoir plus : touschercheurs.com



La volonté d'impliquer des non-professionnels de la science pour en faire des acteurs de production de connaissances est réaffirmée dans le document d'orientation Inra 2025. D'ores et déjà, l'institut anime et coordonne de nombreux projets participatifs, parfois anciens, couvrant toute la gamme, du *crowdsourcing* à la coconstruction, et impliquant plusieurs types de public, plus ou moins concernés. Les encadrés de cet article illustrent une partie de ce foisonnement.

Cette diversité impose de répondre à quelques questions quant à la nature de la science produite par les démarches participatives : s'agit-il encore de science ? D'une autre science ? D'une vraie science ?

L'apparition de la participation de non-chercheurs dans un nombre toujours plus grand de publications dans des revues scientifiques plaide pour un réel statut scientifique des recherches participatives : c'est bien de la science qu'elles produisent, et la communauté scientifique l'admet de plus en plus facilement. Ce n'était pas nécessairement le cas il y a quelques années, quand certains remettaient en cause par exemple

Un territoire rural riche d'initiatives

Bienvenue à Mirecourt, commune des Vosges, à l'ouest d'Épinal. Dans cette région marquée par un contexte

socioéconomique difficile, l'unité Inra ASTER-Mirecourt (AgroSystèmes Territoires Ressources) est dédiée à l'étude de la transition des systèmes agricoles vers plus de durabilité et a entrepris de participer à cet effort en s'investissant dans un Living Lab (un dispositif de recherche et d'innovation où citoyens, habitants, usagers sont des acteurs clés) nommé Teaser Lab. Le dispositif a reçu un soutien financier de la Fondation de France. L'idée est de fédérer les initiatives, existantes et à venir, pouvant aider à construire un système alimentaire sain, local, durable et créateur d'emplois. La ferme expérimentale de l'unité, convertie en bio depuis 2004 et qui a entrepris une importante diversification de ses productions pour contribuer au système alimentaire, est au cœur du projet qui réunit aussi un établissement médicoéducatif, des associations, un café citoyen, les foyers ruraux, des collectivités...

Un chargé de projet anime le Living Lab en organisant des ateliers, des groupes thématiques, en mutualisant et en faisant circuler l'information, en élargissant progressivement le cercle des acteurs, en favorisant l'émergence de chantiers participatifs. C'est l'occasion pour les chercheurs d'étudier *in situ* la construction d'un système alimentaire territorialisé.





Un arc-en-ciel de pollen



Les abeilles rapportent à la ruche du nectar, mais aussi du pollen sous la forme de pelotes accrochées à leurs pattes. Ces petites boulettes sont de plusieurs couleurs, d'où l'idée que la diversité de ces couleurs refléterait la biodiversité. C'est l'hypothèse de départ du projet CSI Pollen, né en Autriche et aux Pays-Bas et dont la déclinaison française est coordonnée par Jean-François Odoux. Entre 2014 et 2016, ce chercheur anime un réseau de près d'une centaine d'apiculteurs de toutes catégories, mais aussi des établissements scolaires et des communes dotés de ruches. Chacune est équipée d'un petit dispositif qui recueille, sur une période de 24 heures, le pollen. À charge ensuite pour celui ou celle qui s'occupe de la ruche de trier les pelotes selon leurs couleurs. L'ensemble des données collectées est ensuite analysé à l'échelon européen. Premier enseignement, et c'est assez inattendu, la diversité des pollens est maximale en juin et minimale en août et septembre. Autre résultat intéressant, les abeilles de plusieurs ruches voisines se répartissent l'environnement pour exploiter au mieux la nature.

L'aspect pédagogique est aussi à mettre à l'actif de l'opération. En témoigne Alban, responsable de « Ma ruche à la maison », qui a apprécié le programme auquel il a fait participer des apprentis apiculteurs et des lycéens.



la qualité des données collectées. Désormais, la contribution du *crowdsourcing* aux savoirs scientifiques est reconnue, sous réserve naturellement qu'il soit correctement conçu et mis en œuvre. Cette façon de travailler, en mobilisant une grande quantité d'informations recueillies par le public, a par ailleurs l'avantage de produire des résultats autrement inaccessibles.

La participation du grand public permet également aux travaux scientifiques de s'appuyer sur une intelligence collective au sein d'une vaste communauté pour produire des connaissances. C'est par exemple le cas dans le projet *FoldIt*: en 2011, ce jeu vidéo sur le repliement des protéines, développé à l'université de Washington, a permis, grâce aux nombreux joueurs, de découvrir en trois semaines la structure tridimensionnelle d'une protéine du virus M-PMV sur laquelle butaient les chercheurs depuis plus de dix ans.

L'intelligence collective est aussi mobilisée dans le cas d'une coconstruction entre chercheurs et acteurs. Dans ce type de projet, les interactions entre les différents partenaires produisent des concepts et des méthodes transposables à d'autres situations; en d'autres termes, de la confrontation des différents registres de savoirs émergent parfois des innovations, mais aussi des connaissances à caractère générique.

Selon les dispositifs de recherche mis en place (*crowdsourcing* ou coconstruction) et les problèmes traités, les résultats obtenus contribuent aussi bien à l'avancée de connaissances fondamentales (cf. *FoldIt*) qu'à la résolution de problèmes en prise avec des questions de société.

DE LA VRAIE SCIENCE!

Les connaissances produites, pour être validées scientifiquement, doivent respecter les normes de la science traditionnelle. Quand il s'agit d'une recherche entreprise en réponse à des questions posées par des acteurs de la société, la pertinence de la recherche pour ces acteurs devient naturellement une dimension essentielle.

Bernard Hubert insiste sur un autre aspect important des connaissances produites par les sciences et recherches participatives : il s'agit de la robustesse, qui fait le lien entre validation et pertinence. Un résultat sera d'autant plus robuste qu'il aura été produit à l'issue d'une collaboration fondée sur des interactions effectives, des apprentissages croisés, de l'exploration collective et qu'il résistera au cours du temps à des mises à l'épreuve. Par exemple, on s'aperçoit qu'une population végétale issue de la sélection participative, conservant de la diversité, sera mieux armée contre les aléas climatiques, les gels tardifs, les précipitations inattendues et des ravageurs, qu'une variété homogène. Ce qui change, ce ne sont pas les techniques de sélection, mais la démarche tout entière et notamment l'entité qui fait l'objet de la sélection: on sélectionne une population végétale plutôt qu'une variété homogène. Il s'agit alors de travailler sur la diversité au lieu d'avoir à la réduire, l'hétérogénéité devenant un atout! Mais cela ne fonctionne que si le processus du travail de sélection a lui-même été « robuste » en impliquant une diversité suffisante de parties prenantes (chercheurs, agriculteurs, techniciens...).

Un autre écueil à appréhender concerne l'éthique. En effet, en faisant cohabiter professionnels de la recherche et non-professionnels, les sciences participatives confrontent des mondes construits sur des contrats sociaux différents: ils ne partagent pas nécessairement les mêmes valeurs et les mêmes finalités dans des activités pourtant communes. « Dans un programme de sciences

Sauver le corégone

Connaissiez-vous le corégone ? Il est peut-être plus connu sous le nom de téra (ou lavaret), ce poisson lacustre de la famille des salmonidés s'affichant à la carte de nombreux restaurants, dans les Alpes et jusqu'à Lyon. Dans la plupart des lacs, ses populations ont progressivement décliné depuis les années 1980, notamment à cause de l'eutrophisation, c'est-à-dire l'augmentation des substances nutritives dans les eaux qui favorise la prolifération d'algues. Cependant, l'histoire est un peu différente au lac d'Annecy qui a été préservé de l'eutrophisation. Malgré tout, une baisse des prises s'est d'abord fait ressentir chez les pêcheurs amateurs à partir de 2004, puis chez les professionnels. Chacun rejetant la faute sur l'autre, des conflits ont opposé les deux groupes dans les années 2007 et 2008.

Pour mieux comprendre les dynamiques et gérer les ressources durablement, un programme de suivi des populations a été mis en place par Daniel Gerdeaux depuis 1992 dans le lac d'Annecy. Il est aujourd'hui dirigé par Chloé Goulon et Jean Guillard.

Sur ce plan d'eau, on compte actuellement deux pêcheurs professionnels et quelque 800 amateurs. Tous ont été invités à collecter des informations précieuses : taille et nombre de poissons pêchés, zone de pêche, effort consenti (nombre de prises par unité de temps), échantillons d'écaillés prélevés... Les données recueillies montrent qu'aujourd'hui la situation des corégones s'est améliorée. Deux explications sont possibles. D'abord, la réglementation relative à la pêche, modifiée en 2011,



Un pêcheur amateur de corégones sur le lac d'Annecy.

a changé la taille légale des prises, les quotas accordés à chaque pêcheur amateur et le nombre de licences professionnelles. Ensuite, des conditions environnementales qui ont été favorables à la reproduction naturelle et à la survie des larves de corégones. Selon Pierre Boutillon, pêcheur amateur, le bilan de sa participation est très positif. Les pêcheurs accordent plus de valeur aux études auxquelles ils ont été associés et peuvent devenir plus « exigeants » vis-à-vis des organismes dès lors qu'ils mettent la main à la pâte. Ils souhaitent intensifier leur participation.

L'amélioration observée va-t-elle perdurer ? Rien n'est moins sûr tant le changement climatique s'accompagne de fluctuations importantes et imprévisibles de l'environnement. Là aussi, le programme participatif joue un rôle essentiel : il permettra d'anticiper ces effets.

et de recherches participatives, prévient Léo Coutellec, de l'université Paris-Sud, la première étape, indispensable, consiste à traiter cette question. Définir les valeurs de chacun. Préciser les concepts mobilisés. Expliciter les motivations, les finalités de chacun. Sans ce préalable, des conflits apparaissent, notamment au moment de l'interprétation des résultats, voire au moment de la mise en place des méthodologies ou de la valorisation des travaux.» Pour éviter un échec, il préconise également de prendre le temps de définir ensemble, chercheurs et non-chercheurs, l'objet au cœur du programme.

ET DEMAIN ?

D'une façon générale, au terme de ce rapide panorama, un constat s'impose : les sciences et recherches participatives favorisent le rapprochement et le dialogue entre sciences et société. En outre, en impliquant un public toujours plus large, elles contribuent à mieux faire connaître la démarche scientifique, ses méthodes, ses ambitions. Un atout essentiel aujourd'hui, quand l'importance des enjeux liés à la recherche est devenue telle qu'une certaine réappropriation de la science par les citoyens semble indispensable. Cependant, surtout quand le public prend une part non négligeable à sa construction, on doit veiller à ce que la science soit pratiquée à l'abri des doctrines.

À cet effet, une Charte française des sciences et recherches participatives a été signée officiellement le 20 mars 2017 par divers établissements d'enseignement supérieur et de recherche, des organisations non gouvernementales, des associations, en présence de Thierry Mandon, alors secrétaire d'État chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Ce texte prend la mesure du potentiel, mais également des risques liés aux sciences participatives et formule à ce titre quelques recommandations : présentation claire des méthodes et des ressources, utilisation concertée des données, respect de la vie privée.

Face à la « scientification », à la « technologisation » de la société qu'ils subissent, les citoyens ont vraisemblablement de plus en plus envie de participer, de faire, de comprendre... Derrière ce mouvement de fond, de fort développement des sciences et des recherches participatives, c'est la question de la démocratie qui se cache. Un vrai enjeu, très actuel : la participation à la production des savoirs scientifiques, la compréhension même du fonctionnement de la science, prémunit sans doute contre les croyances diverses et variées de plus en plus nombreuses. La crédulité se nourrit de l'ignorance. Le président du Tribunal révolutionnaire avait tort, la République a besoin de savants, du plus grand nombre possible de savants ! ■

L'ESSENTIEL

> Depuis presque trente ans, des chercheurs en sciences sociales étudient l'égalité devant les contrôles de police et l'efficacité de ces derniers.

> En France, des études sur le terrain ont ainsi récemment révélé que la proportion de personnes contrôlées dans différentes villes de France est plus importante dans

les minorités ethniques que dans la majorité.

> Des enquêtes par questionnaire ont aussi montré que les jeunes Maghrébins subissent plus souvent des contrôles répétés.

> Pourtant, les contrôles détectent très peu de délits et fragilisent la confiance.

L'AUTEUR



SEBASTIAN ROCHE
directeur de recherche
au CNRS, au laboratoire de
sciences sociales Pacte (CNRS,
université Grenoble-Alpes,
Sciences-Po Grenoble)

Des Contrôles de contreproductifs

Aujourd'hui, il est possible d'évaluer de façon rigoureuse l'égalité devant les contrôles de police et leur efficacité. Résultat : non seulement ils ciblent plus souvent les minorités ethniques, mais ils repèrent peu d'infractions et sapent la confiance dans la police.

Dans les pays démocratiques, les policiers sont dotés de pouvoirs extraordinaires au sens littéral du terme – des pouvoirs que les autres personnes n'ont pas. Ceux-ci ne leur appartiennent pas : par le truchement de lois diverses, l'autorité politique les leur «prête», ayant elle-même obtenu, via l'élection, le droit moral à nous contraindre. Ces pouvoirs permettent aux policiers de faire légalement ce qui est interdit aux autres agents et citoyens, comme porter atteinte aux droits fondamentaux des personnes en entrant dans nos maisons, nos ordinateurs, en nous empêchant de circuler librement et en nous contrôlant dans la rue, avec usage de la force si besoin.

La manière d'user de ces contraintes est un élément de la démocratie elle-même. Les normes nationales et internationales auxquelles la France a souscrit mettent en avant que le gouvernement ne peut pas abuser de ses pouvoirs et doit traiter de manière égale tous les citoyens, et aussi que la police est au service du peuple. En particulier, le code de

déontologie de la police et de la gendarmerie précise que «le policier ou le gendarme ne se fonde sur aucune caractéristique physique ou aucun signe distinctif pour déterminer les personnes à contrôler» (article R. 434-16).

L'INÉGALITÉ FACE AUX CONTRÔLES : LE PRIX DE L'EFFICACITÉ ?

Cependant, en pratique, les contrôles et l'usage de la force se révèlent problématiques. En effet, y compris dans les démocraties libérales, ils sont distribués dans la population de manière inégale et souvent, mais pas toujours, discriminatoire. Or si dans certains pays, comme le Royaume-Uni ou le Canada, l'autorité politique juge urgent de remédier à cette inégalité, dans d'autres, comme la France, le gouvernement refuse de la voir.

De leur côté, les polices avancent régulièrement, par la voix de leurs responsables ou de leurs représentants syndicaux, que l'inégalité est le prix de l'efficacité, et ainsi que l'injustice faite aux minorités est acceptable moralement puisqu'elle est utile à la tranquillité publique

police



A Paris, les contrôles policiers concernent-ils plus les minorités ethniques? Et si oui, sur quoi cette disparité est-elle fondée? Une chose est sûre : les interpellations déclenchées par une altercation, comme ici une nuit d'octobre 2010, n'en constituent qu'une très faible proportion...

> du plus grand nombre. Des organisations de la société civile dénoncent quant à elles tant ces pratiques, qu'elles jugent discriminatoires, que leurs justifications – sans succès.

Depuis presque trente ans, des sociologues, criminologues et chercheurs en sciences politiques se sont emparés de cette question afin d'y apporter des réponses rigoureuses. Aujourd'hui, les concepts et méthodes se sont considérablement perfectionnés et affinés, et des résultats clairs se dégagent, documentant les deux enjeux essentiels de ces débats : l'égalité devant les contrôles de police et l'efficacité de ces derniers.

Certains pays sont en avance sur d'autres : ceux dont l'autorité politique s'est saisie de la question – ou y a été contrainte sous la pression de cas devenus des scandales – et qui ont développé des outils statistiques pour suivre le travail des agents de police, comme les États-Unis, le Canada ou le Royaume-Uni. Dans ces pays, les contrôles de police sont enregistrés et, depuis longtemps, des études approfondies des données statistiques ainsi engrangées mesurent en interne le travail de la police. Cette dernière – ou l'autorité qui l'emploie – commande aussi des recherches spécifiques sur le terrain.

La France, en revanche, fait partie de la seconde catégorie, comme l'Allemagne. En France, le contrôle de police ne fait pas l'objet d'un enregistrement (et le groupe ethnique de la personne contrôlée non plus). Sa pratique est donc inconnue des supérieurs hiérarchiques des agents, locaux ou nationaux, y compris le ministre de l'Intérieur. Néanmoins, même dans cette configuration peu favorable à la connaissance, des études indépendantes de la police et de l'autorité politique ont été réalisées et commencent à donner des réponses. Voici un aperçu des principaux travaux menés en France et à l'étranger, dans des environnements institutionnels et économiques comparables.

DISPARITÉ OU DISCRIMINATION ?

Les obstacles de méthode sont nombreux pour produire un savoir rigoureux et répondre aux objections quant à la signification des chiffres produits, car même la définition des objets de l'étude est complexe. En effet, qu'entend-on par contrôle de police « discriminatoire » ? Et par contrôle « efficace » ? Et une fois ces objets définis, comment les mesurer ? Ainsi, plusieurs difficultés doivent être surmontées avant de savoir s'il y a ou non discrimination. D'abord, il convient de distinguer disparités et discriminations.

Ici, nous nous focalisons sur les discriminations ethniques, mais on aborderait de même celles relatives au genre, à la religion ou à l'orientation sexuelle. L'identité ethnique se réfère à des catégorisations sociales des groupes en fonction des apparences physiques et surtout de la

couleur de la peau. Ainsi, il y a disparité ethnique lorsque le nombre de contrôles de police réalisés parmi 100 personnes ayant la peau foncée est supérieur au nombre de contrôles réalisés parmi 100 personnes ayant la peau plus claire.

Mais toute disparité mesurée n'est pas discrimination. L'écart entre les taux de contrôle des deux populations – c'est-à-dire la surreprésentation des contrôles de police dans une population par rapport à l'autre – peut être réel et cependant résulter non pas de la couleur de peau, mais des comportements des personnes : le fait de commettre plus souvent des infractions, de ne pas respecter le code de la route, d'avoir des comportements qui dérangent la tranquillité publique, de se trouver impliqué dans des altercations qui engendrent un contrôle de police, ou même de passer plus souvent dans les zones où les contrôles sont réalisés, par exemple. C'est pourquoi on ne parle de discrimination ethnique que si les disparités sont fondées sur un traitement défavorable par la police en raison de critères autres que les comportements des personnes – notamment leur apparence physique. Pour déterminer s'il y a discrimination, il faut donc procéder en deux temps : établir s'il y a disparité (ou surreprésentation), puis si celle-ci traduit ou non une discrimination.

TROUVER LA BONNE VALEUR DE RÉFÉRENCE

Prenons la disparité. Au cours d'une journée, les policiers réalisent un certain volume de contrôles dans divers lieux et sur un certain nombre de membres de la majorité et des minorités ethniques. Comment savoir si le nombre de contrôles d'une minorité est « trop » élevé par rapport à celui de la majorité ? Pour ce faire,



En France, le contrôle de police ne fait pas l'objet d'un enregistrement



il faut rendre comparables ces deux nombres, c'est-à-dire les rapporter à des valeurs comparables dans les populations majoritaire et minoritaire de référence. Mais quelle valeur choisir ? Se contenter de la taille des deux populations n'est pas satisfaisant : majorité et minorité n'ont

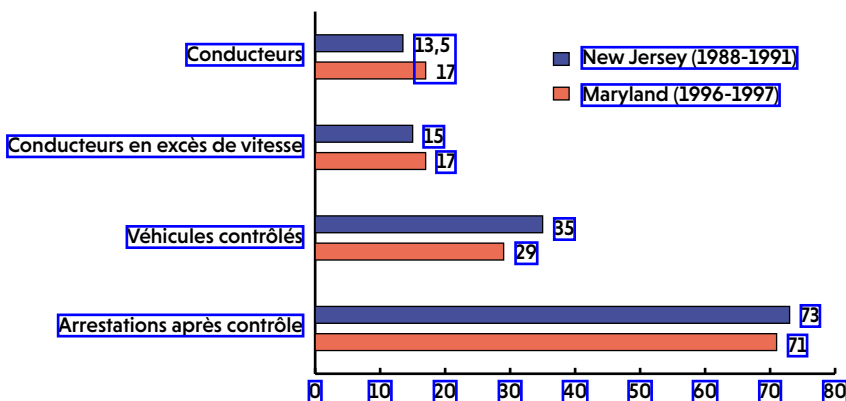
ÉVALUER LA PROPORTION DE NOIRS CONTRÔLÉS SUR L'AUTOROUTE

En 1996, le psychologue social américain John Lamberth, de l'université Temple, à Philadelphie, mit au point une méthode pour déterminer si les contrôles de police sur l'autoroute de la côte est des États-Unis, l'interstate 95, étaient discriminatoires au niveau d'un échangeur du New Jersey (en bleu). Avec ses collègues, il commença par enregistrer le profil ethnique de chaque conducteur passant par un échangeur. Concrètement, des observateurs

situés sur le côté de la route, un pour chaque voie, disposaient d'un assistant qui prenait les notes qu'ils dictaient et comptabilisait le nombre de voitures et le groupe ethnique de chaque conducteur. Ils ont mené ces observations durant 21 sessions de 3 heures aléatoirement sélectionnées sur des plages horaires entre 8 et 20 heures d'avril 1988 à mai 1991. Les chercheurs ont ainsi dénombré 43 000 voitures, dont 13,5 % étaient conduites par des Noirs.

Dans le même temps, un collègue conduisait une voiture 5 miles par heure au-dessus de la limite autorisée ; il catégorisait chaque voiture qui le doublait comme « en infraction » et chaque voiture qu'il doublait comme « pas en infraction », tout en notant le groupe ethnique de la personne au volant. Sur les 2 096 voitures ainsi classées en infraction, 15 % avaient un conducteur noir. Pourtant, les données fournies par la police sur l'interstate 95 montrent que 35 % des personnes contrôlées étaient des Noirs – soit une proportion bien plus grande que celle des conducteurs noirs dans la population recensée. Ce qui n'a pas empêché les policiers d'arrêter dans 73 % des cas les Noirs qu'ils contrôlaient, soit 16,5 fois plus que les personnes des autres groupes ethniques... Une étude ultérieure dans le Maryland a abouti à des résultats comparables (en rouge).

POURCENTAGE DE NOIRS PARMIS LES...



pas nécessairement la même structure (âge, catégorie socioprofessionnelle, lieu de résidence). Cela signifie, d'une part, que les personnes n'ont pas à la même fréquence les comportements susceptibles de déclencher un contrôle et, d'autre part, qu'elles ne se trouvent pas dans les mêmes lieux aux mêmes moments (ce qui modifie ce qu'on appelle la disponibilité au contrôle).

Pour déterminer si une disparité est due à une discrimination, on doit donc évaluer si des comportements particuliers propres à la minorité justifient la disparité observée. Là encore, il s'agit de trouver une bonne valeur de référence du comportement incriminé, afin de pouvoir comparer les comportements des deux populations.

En 1996, un pas important a été réalisé pour mesurer les disparités et déterminer s'il y a discrimination. John Lamberth, psychologue social à l'université Temple, à Philadelphie, s'était spécialisé dans l'évaluation statistique du profilage racial. Il fournissait des évaluations, de la formation et du conseil en communication à des universités, des États, des municipalités, des forces de police, des parties au procès, des organisations de défense des droits civiques ainsi qu'aux communautés concernées. Dans les années 1990, un avocat du New Jersey le sollicita : lui rapportant que seuls les Noirs étaient contrôlés et arrêtés pour détention de drogue,

il lui demanda si un statisticien serait capable d'établir si cela traduisait une discrimination. John Lamberth mit alors au point une méthodologie pour étudier ce type de question, depuis lors considérée comme un étalon.

L'ÉCHANGEUR DU NEW JERSEY

John Lamberth mena son étude dans le New Jersey, sur un échangeur de l'interstate 95, l'autoroute qui longe la côte est des États-Unis, et choisit pour valeur de référence la proportion de personnes considérées comme noires empruntant l'échangeur. Pour ce faire, il mit au point un système lui permettant de compter les profils ethniques de tous les conducteurs qui prenaient l'échangeur. Avec ses collègues, il comptabilisa ainsi 43 000 voitures en 21 sessions d'observation de trois heures, qui constituèrent une base à partir de laquelle les chercheurs déterminèrent la proportion de Noirs parmi la population présente, soit 13,5% (voir l'encadré ci-dessus).

L'équiperegistra par ailleurs les profils ethniques de tous les conducteurs qui ne respectaient pas la limite de vitesse (et roulaient au moins 5 miles par heure au-dessus de celle-ci), ce qui lui fournit une seconde valeur de référence : la proportion de conducteurs noirs parmi ceux en infraction sur l'échangeur. Au total, 2 096 voitures étaient en excès de vitesse, dont 15% conduites par des Noirs.

> John Lamberth rapporta alors à ces deux valeurs de référence les données sur l'interstate 95 fournies par la police. Selon cette dernière, 35% des personnes contrôlées sur l'échangeur étaient noires. Lorsque l'on rapporte ce taux de personnes noires contrôlées à la première valeur de référence, soit la proportion de conducteurs noirs présents (13,5%), la surreprésentation des Noirs dans les contrôles de police est nette. Et de même, la comparaison avec la seconde valeur de référence, la proportion de conducteurs noirs en infraction (15%), montre que la proportion de Noirs contrôlés est plus importante que celle des Noirs en infraction. En d'autres termes, le comportement des Noirs ne justifiait pas leur surreprésentation dans les contrôles de police. Et par conséquent, la disparité ethnique mesurée résultait d'une approche policière discriminatoire: les Noirs étaient particulièrement ciblés (environ 4,85 fois plus) du fait de leur apparence. Une étude ultérieure dans le Maryland aboutit à des conclusions comparables. Dans les deux États, ces contrôles ont abouti à des arrestations dans plus de 70% des cas (respectivement 73 et 71%) soit 16,5 fois plus que dans les autres groupes ethniques.

GARE DU NORD, À PARIS, 82% DES CONTRÔLES CONCERNENT DES PERSONNES NON BLANCHES

Quelques années plus tard, Fabien Jobard et ses collègues du Centre de recherche sociologique sur le droit et les institutions pénales, à Guyancourt sollicitèrent John Lamberth pour appliquer sa méthode en France, mais cette fois en la centrant sur le contrôle des piétons. Les chercheurs décidèrent de retenir cinq gares parisiennes (RER ou SNCF, voir la figure ci-contre). Entre octobre 2007 et février 2008, des observateurs y comptabilisèrent les contrôles simples, les contrôles avec palpation (fouille légère), les contrôles avec fouille (fouille approfondie, sac et poches) et les conduites au poste de police.

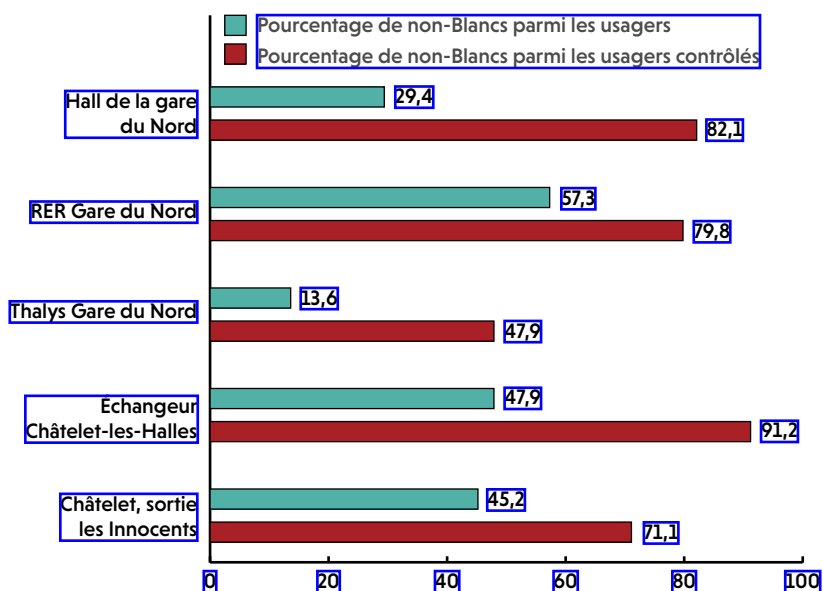
La population de référence serait la proportion de personnes non blanches présentes sur les lieux. Pour la mesurer, les enquêteurs ont observé des emplacements précis (les accès aux gares) et réalisé des décomptes systématiques des passants. Au total, ils ont comptabilisé 37333 personnes durant la période de l'étude. La part des groupes ethniques variait d'une gare à l'autre: par exemple, les Blancs ne représentaient que 23% des usagers de la Gare du Nord RER, mais 86% de la Gare du Nord Thalys.

Parallèlement, les enquêteurs ont aussi observé les contrôles de police pendant 75 jours, de novembre 2007 à mai 2008, sur les mêmes plages horaires que le comptage des usagers. Ils ont ainsi dénombré et analysé 525 contrôles, soit 1,25 par heure. Résultat:



LES CONTRÔLES DANS LES GARES DE PARIS SONT-ILS ÉQUITABLES?

En 2007-2008, des sociologues ont observé les contrôles policiers dans différentes gares parisiennes. Quelle que soit la gare étudiée, et quelle que soit la proportion d'usagers non blancs dans celle-ci, la proportion de personnes non blanches parmi les usagers contrôlés (en rouge) était supérieure à celle des personnes non blanches parmi les usagers (en bleu). Par exemple, dans le hall de la gare du Nord, 29,4% des usagers étaient non blancs, mais 82,1% des contrôles concernaient des usagers non blancs.



comme aux États-Unis, les personnes non blanches avaient fait l'objet d'un net sur-contrôle. Par exemple, dans le hall de la gare du Nord, sur 100 personnes présentes, 29,4 étaient non blanches, mais sur 100 contrôles, 82,1 concernaient malgré tout des non-Blancs, soit une proportion beaucoup plus importante que celle des personnes non blanches présentes.

Ces études sont particulièrement convaincantes du fait de la rigueur utilisée pour mesurer la population de référence. Mais, par définition, elles ne peuvent couvrir que certains contrôles dans des lieux et à des moments déterminés. Elles ne sont pas représentatives de la pluralité des contextes. Par ailleurs, elles saisissent moins bien «l'expérience cumulée» du contrôle pour

un même individu, c'est-à-dire l'éventuelle accumulation des contrôles au cours d'une période de la vie d'une personne, dans diverses situations. Si l'on s'intéresse à la prévalence des expériences de contrôle dans un groupe ethnique, d'une part, ou à l'effet de leur accumulation sur les attitudes, d'autre part, on doit recourir à une autre méthode: les enquêtes par questionnaire. Plusieurs ont été réalisées, de plus en plus perfectionnées, et ont permis d'obtenir une population de référence à laquelle comparer les groupes minoritaires. Ces études offrent un moyen de comparer les pratiques dans différents pays.

PLUS DE CONTRÔLES EN FRANCE QU'EN ALLEMAGNE

Ainsi, dans l'étude EU-Midis, réalisée en 2008 dans les 27 pays de l'Union européenne de l'époque et publiée en 2010, l'Agence européenne pour les droits fondamentaux a mesuré, sur les douze mois précédant l'enquête, les proportions des groupes sociaux majoritaires et minoritaires qui ont fait l'objet d'un contrôle de police dans la rue. L'échantillonnage visait les principaux groupes minoritaires (en France, les Maghrébins et les Africains subsahariens) et le groupe majoritaire dans chaque pays participant.

Pour que l'échantillonnage ne souffre pas des biais d'une probabilité de contrôle liée au cadre de vie, il portait exclusivement sur des quartiers populaires des grandes villes (en France, la région parisienne, Lyon et Marseille). Cela permet de rendre les populations plus comparables: en effet, les différences de revenus déterminent les quartiers de résidence, et le clivage urbain/rural influe sur les styles de vie. Or le risque de contrôle reflète aussi ces différences et pas uniquement le facteur ethnique (les habitants des villages sont plus fréquemment blancs et moins contrôlés).

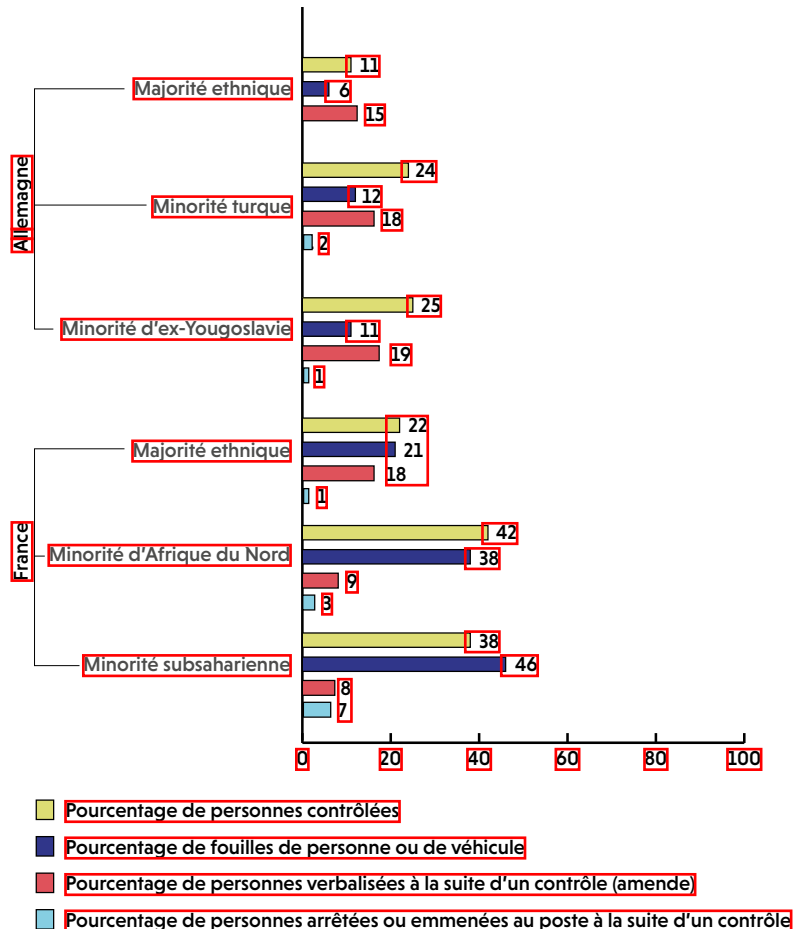
Les enquêteurs ont ainsi questionné, dans chaque pays, à leur domicile, environ 500 personnes de chacun des trois groupes sociaux (majoritaire, minoritaire principal, minoritaire secondaire). En France, l'étude a montré que les groupes minoritaires étaient bien plus contrôlés et plus souvent fouillés que le groupe majoritaire. Il existe donc une disparité (voir la figure ci-contre). Et lorsque l'on compare la France et l'Allemagne, deux pays proches par leur richesse nationale, leur population, la taille des villes et la présence de minorités extra-européennes, les résultats révèlent de nettes différences dans les pratiques: majorité et minorités sont plus exposées aux contrôles de police en France qu'en Allemagne, et plus aussi aux fouilles. Le taux de contrôle des minorités en France est 3,5 fois plus élevé.

De fait, un volet observationnel d'une vaste étude franco-allemande, «Polis», dont les résultats sont parus en 2016, a révélé que les



LES CONTRÔLES DE POLICE EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE

Selon l'étude EU-Midis, menée en 2008, les politiques de contrôle en France et en Allemagne diffèrent. La police allemande utilise presque deux fois moins le contrôle d'identité, que ce soit dans la population majoritaire ou celles des principales minorités (en jaune). Et si, dans les deux pays, les minorités sont plus contrôlées que le groupe majoritaire, en France, les contrôles concernent 42% et 38% des deux groupes minoritaires considérés, contre seulement 24% et 25% en Allemagne. Par ailleurs, le contrôle ne se déroule pas de la même manière dans les deux pays. En Allemagne, il est peu souvent accompagné d'une fouille, tandis qu'en France, les fouilles sont bien plus fréquentes dans le groupe majoritaire et encore plus dans les groupes minoritaires (en bleu foncé). Le rendement des contrôles est aussi moins bon en France dans les groupes minoritaires: en Allemagne, la proportion de personnes verbalisées ne varie pas d'un groupe à l'autre, alors qu'en France deux fois plus de personnes contrôlées issues des minorités sont verbalisées (en rouge). La proportion d'arrestations est aussi très faible (en bleu ciel).

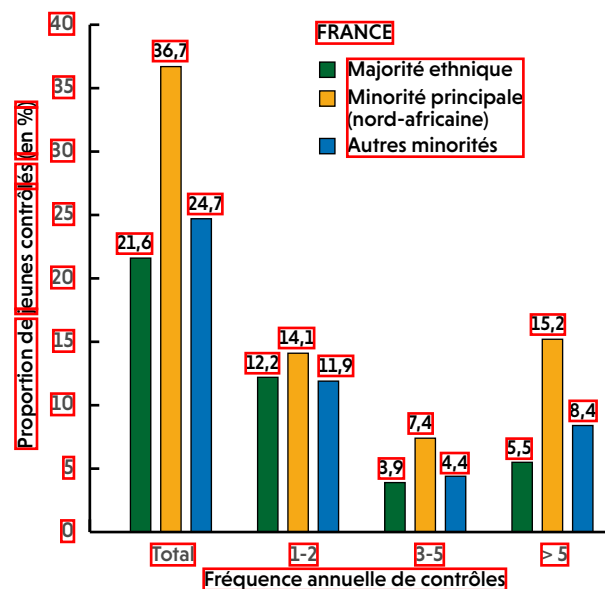
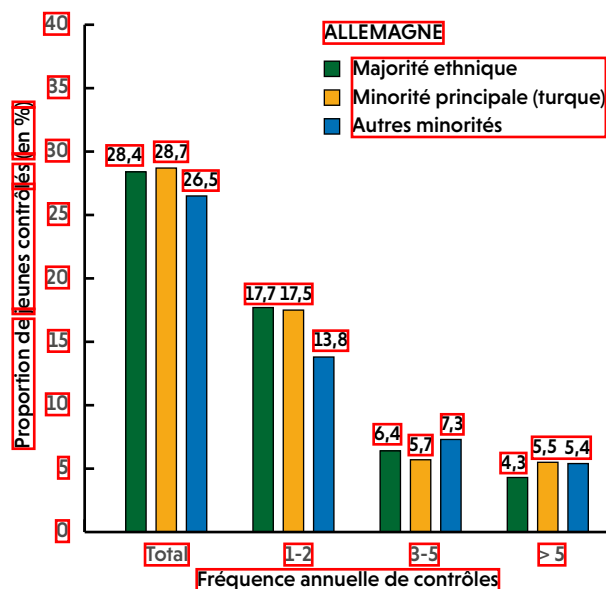


DU CÔTÉ DES JEUNES, EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE

Dans une étude récente, Polis, l'auteur et ses collègues ont étudié la répétition de l'exposition au contrôle en interrogeant 22 000 adolescents en France et en Allemagne entre 2011 et 2012. Tirés au hasard dans deux villes de chaque pays, les jeunes ont été classés en trois groupes ethniques : la majorité, la minorité principale et les autres minorités. Puis les chercheurs ont examiné, pour chaque groupe, combien de personnes avaient été contrôlées rarement (1 à 2 fois dans l'année),

de façon occasionnelle (3 à 5 fois) ou fréquemment (plus de 5 fois). Ils ont ainsi montré que, là aussi, des différences existent entre les deux pays. Alors que les taux de contrôle en Allemagne sont distribués de façon très semblable entre la majorité et les minorités (à gauche), même s'agissant des contrôles fréquents, il n'en va pas de même en France. Les contrôles fréquents concernent nettement plus les minorités que la majorité, en particulier la minorité d'origine nord-africaine (à droite).

COMBIEN DE FOIS AVEZ-VOUS ÉTÉ CONTRÔLÉ CETTE ANNÉE ?



► contrôles de police n'ont pas le même objectif dans ces deux pays. En combinant observations directes et entretiens avec des policiers, mon équipe, avec Jacques de Maillard, professeur de sciences politiques à l'université Versailles-Saint-Quentin, et d'autres collègues en France et en Allemagne, avons mis en évidence plusieurs différences. En France, le contrôle de police est devenu un outil banalisé et largement utilisé comme moyen de détection des infractions : on contrôle une personne en fonction de son groupe ethnique apparent en espérant trouver quelque chose d'illégal. En Allemagne, le contrôle n'est pas valorisé par les policiers. Les délits sont verbalisés quand ils sont pris sur le fait, et les contrôles ne servent pas spécialement à en détecter. Par ailleurs, les policiers font plus attention à ne pas cibler inutilement les minorités.

Les enquêtes par questionnaire sont aussi une des méthodes pour évaluer si une personne est plus fréquemment contrôlée quand elle appartient à une minorité ethnique. C'est ainsi que, dans un autre volet de l'étude Polis, mon équipe, conjointement à celle de Dietrich Oberwittler, de l'institut Max-Planck à

l'université de Fribourg, a récemment étudié la répétition de l'exposition des adolescents au contrôle et ses effets sur leur confiance dans la police.

EN FRANCE, DAVANTAGE DE CONTRÔLES RÉPÉTÉS CHEZ LES JEUNES MAGHRÉBINS

L'étude, qui a consisté à interroger 22 000 collégiens et lycéens (de 13 à 18 ans) de deux villes françaises (Lyon et Grenoble) et deux villes allemandes (Mannheim et Cologne) entre 2011 et 2012, est la plus importante du genre. Nous avons construit notre échantillon d'adolescents par tirage aléatoire de classes dans les différents établissements des villes, une méthode qui garantit une bonne représentation des minorités.

Comme dans l'étude EU-Midis, nous avons classé les adolescents en trois groupes ethniques : la majorité, la minorité principale et les autres minorités. Nous avons ensuite examiné la proportion d'individus de chaque groupe ayant subi des contrôles et la fréquence annuelle de ceux-ci. Nous avons ainsi observé qu'en Allemagne, la proportion d'adolescents

contrôles varie peu d'un groupe à l'autre, dans toutes les tranches de fréquence des contrôles. En France, en revanche, si la proportion de contrôles occasionnels est très semblable entre la majorité et les minorités, les contrôles fréquents concernent nettement plus les minorités, en particulier les jeunes d'origine nord-africaine (voir l'encadré page ci-contre).

La surexposition aux contrôles de police des jeunes des minorités ethniques peut s'expliquer en partie par leur style de vie. Un encadrement familial moins strict, conjugué à l'exiguïté du logement et à l'effet d'entraînement des groupes de pairs en zone HLM, les pousse à passer du temps dans les rues le soir. On observe aussi qu'ils ont une propension plus grande à commettre des délits de rue, même s'il y a débat sur les explications à retenir, socioéconomiques ou culturelles. Aussi l'enquête mesure-t-elle ces comportements (être dans la rue, commettre des délits) qui exposent au contrôle policier et intègre-t-elle ces paramètres aux modèles statistiques afin d'isoler l'effet des comportements, d'une part, et de l'appartenance ethnique proprement dite, d'autre part, sur le contrôle de police.

Néanmoins, même en prenant ces précautions, l'appartenance à un groupe ethnique minoritaire a bien un effet propre sur le déclenchement du contrôle en France, alors qu'elle n'en a pas en Allemagne. En d'autres termes, en France, le contrôle policier des jeunes est pratiqué de façon discriminatoire. Enfin, cette

autre, montre que l'idée d'égalité devant la loi en sort altérée. En effet, les contrôles touchent essentiellement des personnes innocentes : n'ayant rien fait de mal, elles ne comprennent pas pourquoi la police s'en prend à elles. Et encore moins pourquoi les contrôles se répètent.

DES CONTRÔLES PEU EFFICACES POUR DÉTECTER DES INFRACTIONS

Alors, les contrôles de police sont-ils efficaces pour réduire la délinquance ? La police avance souvent cet argument pour justifier leur multiplication, qu'il s'agisse des contrôles routiers aux États-Unis ou des contrôles à pied en France. Dès l'origine des travaux sur les contrôles, ce point a fait débat. Qu'en est-il réellement ? Là aussi, des enquêtes par questionnaire ont apporté des réponses. L'enquête EU-Midis et l'étude du Défenseur des droits, notamment, ont montré que les contrôles sont peu efficaces pour détecter des infractions.

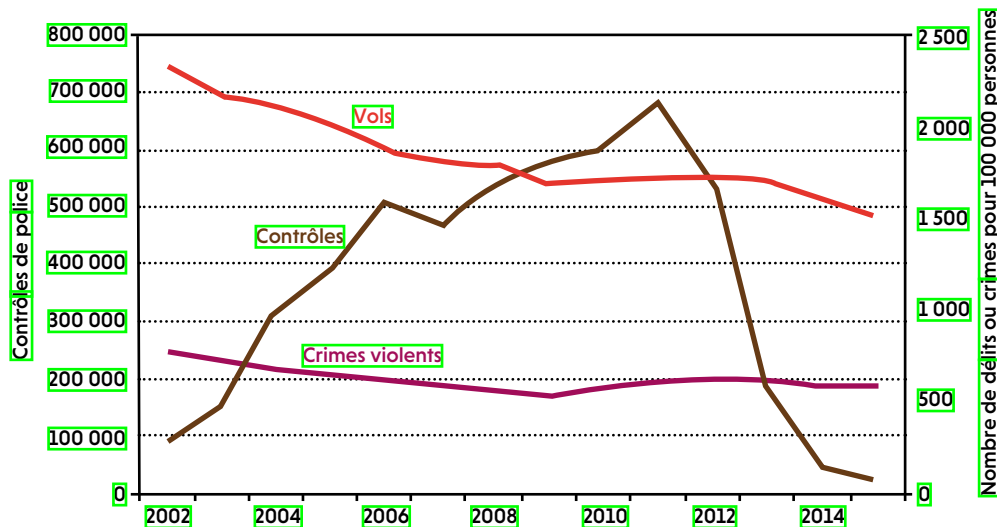
Avec l'étude EU-Midis (voir la figure page 61), on voit les conséquences de deux types d'usage des contrôles. Le premier type concerne les infractions routières : leur observation ou suspicion déclenche le contrôle et l'amende. C'est la sanction la plus fréquente (entre 8 et 19 % des populations considérées en ont reçu au moins une sur un an). Le second type concerne l'usage « discrétionnaire » du contrôle : on cherche des suspects à partir de divers indices, et cela débouche sur une arrestation ou une conduite au poste si une infraction est détectée. Dans ce cas, le rendement des contrôles – la proportion de délits détectés pour cent contrôles effectués – est très faible : le plus souvent, les policiers ne trouvent rien et il n'y a donc pas de suite.

Un examen détaillé des conséquences des contrôles permet trois observations. D'abord, en Allemagne, la police utilise le contrôle quasi exclusivement après avoir détecté une infraction, pour verbaliser avec une amende, ce qui est moins vrai en France. Ensuite, en Allemagne, les sanctions sont homogènes à travers les groupes ethniques (il y a peu de différences entre eux), ce qui n'est pas le cas en France. Enfin, dans les deux pays, on remarque que l'efficacité de détection des contrôles discrétionnaires est très limitée. En Allemagne, 98-99 % (pour les minorités) à 100 % (pour la majorité) des contrôles, et en France, 93-97 % (pour les minorités) à 99 % (pour la majorité) n'occasionnent pas de mesure coercitive (arrestation ou conduite au poste). En Allemagne, ces faibles taux d'infractions détectées découlent du fait que les policiers ne recherchent pas d'« affaire » avec les contrôles. Mais en France, où les contrôles sont nettement plus fréquents, les faibles taux de détection de délits montrent le peu de pertinence de cette pratique pour trouver des auteurs d'infractions. Ce que confirme l'étude du ➤

En France, plus un jeune est contrôlé, moins il a confiance dans la police

recherche montre l'effet des contrôles sur la confiance des jeunes dans la police : elle diminue nettement et linéairement avec leur répétition, tant pour les filles que pour les garçons, et tant dans la majorité que dans les minorités ethniques. En d'autres termes, plus un jeune est contrôlé, moins il a confiance dans la police...

L'enquête EU-Midis et une étude du Défenseur des droits réalisée en France métropolitaine du 19 février 2016 au 31 mai 2016 sur 5 117 personnes dont 753 contrôlées ont fourni des résultats comparables. Cette dernière, en



A NEW YORK, UNE POLITIQUE DE CONTRÔLES PEU DISSUASIVE

Dans les années 2000, la police locale a considérablement augmenté le nombre de contrôles effectués (en marron). Mais selon une étude des registres policiers, cette politique ne s'est pas accompagnée d'une diminution du taux de criminalité (en rouge et violet).

➤ Défenseur des droits: seules 5,9% des personnes contrôlées ont été emmenées au poste de police, et dans 94,1% des cas, le contrôle a été inutile car sans suite judiciaire (sans compter que, souvent, le simple fait de protester lors d'un contrôle peut conduire une personne au poste – un comportement plus fréquent dans les populations en tension avec la police –, ce qui réduirait encore le «rendement»).

Par ailleurs, dans l'Hexagone, le rendement des contrôles mesuré par les amendes est moins bon dès lors qu'il s'agit des minorités: les policiers français verbalisent deux fois moins ces dernières que la majorité (8 et 9% des personnes contrôlées issues des minorités ont reçu une amende, contre 18% de celles issues de la majorité, selon l'étude EU-Midis). Il n'est pas meilleur en termes d'arrestations s'agissant des personnes issues d'Afrique du Nord (3% contre 1% pour la population majoritaire), et reste faible pour celles issues d'Afrique subsaharienne. C'est la rançon du ciblage ethnique: les personnes ont une couleur de peau qui déclenche le contrôle au détriment de l'efficacité policière.

PLUS DE CONTRÔLES, MOINS DE DÉLINQUANCE?

À défaut d'être efficaces pour détecter les délits, les contrôles de police auraient-ils au moins un effet dissuasif? Pour le déterminer, les pays où les policiers enregistrent les pratiques de contrôle disposent sans conteste de données bien plus complètes et riches que ceux qui, comme la France et l'Allemagne, ne le font pas. Le cas de New York est emblématique. La police locale avait décidé d'utiliser massivement les contrôles jusqu'à ce qu'une cour de justice interdise cette pratique au motif qu'elle était discriminatoire. Les données montrent que la multiplication des contrôles, à l'échelle de la ville entière, n'est pas corrélée avec les

tendances de la délinquance (voir la figure ci-dessus). Et, à l'échelle des quartiers, les études disponibles n'ont pas pu non plus montrer leur efficacité. «Nous avons eu tort», a écrit le conservateur Kyle Smith à propos de la politique du département de police de New York, centrée sur les contrôles.

Une autre étude, à Londres cette fois, est tout aussi édifiante. Début 2018, Matteo Tiratelli, de l'université de Manchester, et ses collègues ont publié une synthèse sur l'efficacité des contrôles dans la capitale britannique à partir de dix ans de données sur la période 2004-2014.

Une politique d'augmentation des contrôles a, au mieux, très peu d'effet

En 2014, la police a effectué 541 000 contrôles, soit 58 % de moins qu'en 2008 ou 2009, où elle avait contrôlé 1 million de personnes. Cette décrue n'a cependant pas influé sur la disparité ethnique: les non-Blancs (nommés «Noirs» au Royaume-Uni) étaient toujours quatre fois plus susceptibles d'être contrôlés. Fréquence et neutralité ethnique du contrôle sont deux notions distinctes, et le ministère de l'Intérieur en France gagnerait à le savoir...

MANIFESTATION A NEW YORK CONTRE LE « STOP AND FRISK »

Attaqué en justice dès 2008 pour discrimination, le programme de contrôle policier « stop and frisk » (arrêt et fouille) mis en place à New York a rassemblé de nombreux protestataires dans les rues, comme ici en 2012. En 2013, la justice fédérale américaine statua que cette pratique violait les droits constitutionnels des minorités de la ville.



Matteo Tiratelli et ses collègues voulaient déterminer si les contrôles dissuadent les délinquants en augmentant leur perception du risque d'être arrêtés ou en perturbant leur activité habituelle. Aussi ont-ils analysé, à partir des registres de la police, le nombre de contrôles réalisés sur différentes périodes et dans chacun des 31 quartiers, et celui de divers types de délits enregistrés dans les mêmes quartiers. L'idée était de rechercher, d'une période à l'autre, une possible influence d'une augmentation des contrôles sur les comportements délinquants. Cet éventuel effet n'étant probablement pas immédiat, les chercheurs ont par ailleurs supposé qu'il fallait qu'un délinquant soit exposé un certain temps au risque supplémentaire de contrôle pour qu'il modifie son comportement.

Résultat: pour l'ensemble des délits de rue considérés, 10% de contrôles supplémentaires ont produit une diminution de la fréquence des infractions à hauteur de 0,14% après une semaine, et de 0,3 % après un mois (de 0,08 et 0,04% pour les vols de voiture, et de 0,03 et 0,13% pour les vols avec violence). Sur les crimes violents, 10% de contrôles en plus ont réduit les infractions de 0,01% après une semaine et de 0% après un mois. Les chercheurs concluent que, même s'il peut exister des cas où les contrôles rendent service et permettent de détecter une infraction, au total, une politique d'augmentation des contrôles a, au mieux, très peu d'effet. Les études similaires conduites à New York et à Chicago présentent des résultats comparables.

LE MYSTÈRE DE LA PRÉFÉRENCE FRANÇAISE POUR LE CONTRÔLE

Ainsi, le panorama qui se dégage des recherches est que les contrôles de police montrent une forte disparité selon l'ethnicité et peuvent être discriminatoires: pour une bonne part, les contrôles sont déclenchés à

partir de l'apparence ethnique des personnes, souvent parce qu'elle est considérée comme un indicateur de la propension à commettre des délits. C'est notamment le cas en France. Cependant, celui de l'Allemagne montre que l'on peut faire moins de contrôles, et autrement, sans cibler autant qu'en France les minorités (pour les adultes) et même pas plus que la majorité (pour les adolescents).

Ce ne sont pas les agents de terrain qui décident des politiques de contrôle, mais le gouvernement et les hauts dirigeants policiers: on le déduit aisément des variations rapides des pratiques à New York ou à Londres, ou des différences entre la France et l'Allemagne. Politiques policières, formation, contrôle des pratiques des agents dépendent des responsables politiques. C'est un point essentiel dans le débat, qui se focalise trop sur les « bons » ou « mauvais » comportements des agents de terrain.

Les conséquences des politiques de contrôle fréquent sont très discutables. Ces politiques ne permettent pas de détecter beaucoup d'infractions et n'influent pas nettement sur les diverses formes de délinquance de rue. De surcroît, parce qu'elles sont souvent discriminatoires, elles augmentent la méfiance et créent un sentiment d'injustice, de dévalorisation de la loi. Enfin, elles coûtent très cher et consomment les moyens humains de la police: un équipage de trois agents fait entre 1 et 1,25 contrôle par heure. Aussi comprend-on qu'il serait utile de modifier ces politiques. Mais il semble que cela s'oppose aux croyances des policiers, dont certains continuent à prêter aux contrôles des vertus qu'ils n'ont pas. Et à celles des responsables politiques qui, pour la plupart, confondent nombre d'agents dans la rue et efficacité sans s'interroger sur ce qu'ils y font. Comment, autrement, expliquer l'usage immodéré des contrôles? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Tiratelli et al., **Does stop and search deter crime? Evidence from ten years of London-wide data**, *Brit. J. Criminol.*, vol. 58(5), pp. 1212-1231, 2018.

Défenseur des droits, **Relations police-population : le cas des contrôles d'identité**, vol. 1, **Enquête sur l'accès aux droits**, 2017. <https://bit.ly/2LUSvGF>

S. Roché, **De la police en démocratie**, Grasset, 2016.

Fundamental Rights Agency, **Contrôles de police et minorités**, 4^e rapport « données en bref » de l'enquête EU-Midis, 2010. <https://bit.ly/2oMjv1M>

J. B. Kadane et J. Lamberth, **Are Blacks egregious speeding violators at extraordinary rates in New Jersey ?**, *Law, Probability and Risk*, vol. 8(2), pp. 139-152, 2009.

L'ESSENTIEL

> Les moteurs électriques triphasés, utilisés dans l'industrie depuis le XIX^e siècle, sont robustes et ont un bon rendement.

> Pour les adapter aux voitures électriques, il a fallu augmenter leur puissance, à poids égal.

> Pour ce faire, les ingénieurs ont joué sur plusieurs

tableaux : vitesse de rotation plus élevée, refroidissement plus efficace, aimants plus puissants, meilleurs systèmes d'électronique et de commande par ordinateur.

> Les prototypes et les moteurs de compétition surpassent déjà les meilleurs moteurs à explosion. Reste le défi de la production en série.

L'AUTEUR



MARTIN DOPPELBAUER
professeur à l'Institut
électrotechnique
de l'université
de Karlsruhe,
en Allemagne

De meilleurs moteurs pour voitures électriques

L'essor des véhicules électriques dépend aussi du développement de leurs moteurs. Lesquels ont connu beaucoup de progrès récents, grâce notamment à de nouveaux matériaux magnétiques. Et ce n'est pas fini : les moteurs de demain seront encore plus performants et légers.

Des machines électriques, qui exploitent le champ magnétique créé par un courant, existent depuis presque deux cents ans, même si le premier système dépassant le stade du démonstrateur n'a été construit qu'en 1834 à Königsberg (Kaliningrad) par l'ingénieur Moritz von Jacobi. Après tant de temps, que peut-il rester à améliorer ?

En fait, bien des progrès ont été réalisés ces vingt dernières années. Ils sont dus à des matériaux magnétiques modernes à base de terres rares, qui donnent des aimants puissants, ainsi qu'à de meilleurs composants électroniques et à des calculateurs puissants, qui ont rendu



possible le contrôle des moteurs avec une vitesse et une précision inédites.

Comme dans le cas des moteurs à explosion, il existe des variantes très différentes de moteurs électriques. Elles sont toutes fondées sur des mises en œuvre particulières des forces magnétiques (voir l'encadré page suivante), mais on distingue deux grands principes: d'une part les moteurs à courant continu et champ magnétique fixe, d'autre part les moteurs triphasés à champ magnétique tournant.

MOTEURS A COURANT CONTINU

Dans les moteurs à courant continu, des balais injectent dans un collecteur rotatif un courant qui alimente des bobinages faisant partie d'une pièce tournante, le rotor. Par construction, la polarité des champs magnétiques induits par le courant dans ces bobines s'inverse une fois par tour, de telle façon qu'elle soit toujours opposée à celle du champ des bobines du stator, l'élément fixe entourant le rotor. Un couple en résulte, qui fait tourner le rotor.

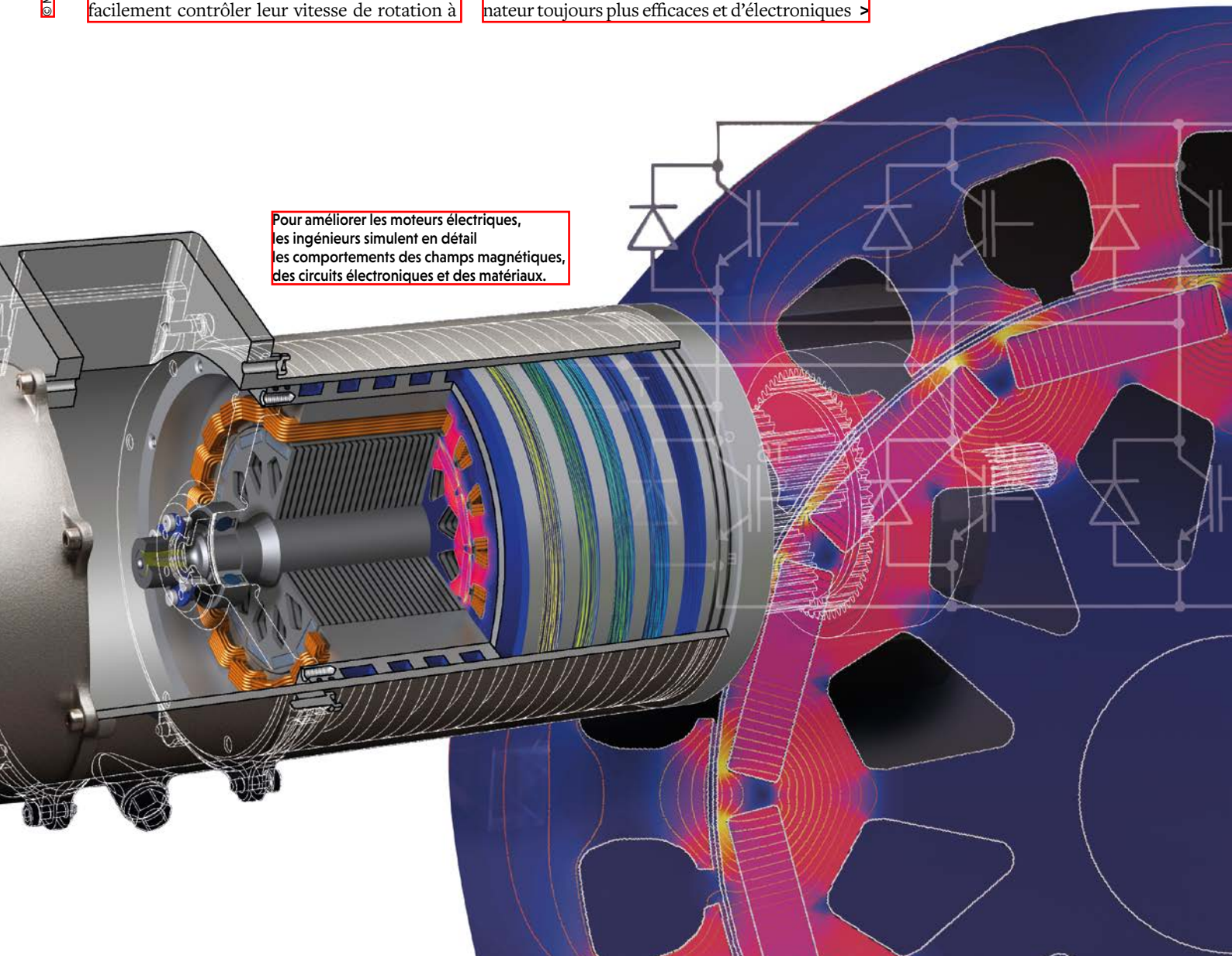
On produit des moteurs à courant continu par millions, notamment parce que l'on peut facilement contrôler leur vitesse de rotation à

l'aide d'une tension électrique. Une voiture de luxe peut ainsi en contenir une centaine, pour régler les sièges, lever les vitres, actionner les essuie-glaces et diverses pompes, ventilateurs et autres compresseurs. Les moteurs à courant continu ne sont cependant adaptés qu'aux faibles puissances: pour les puissances élevées, la structure compliquée du rotor, avec son collecteur et ses balais, les rend onéreux et implique des frottements qui limitent leur durée de vie.

C'est pourquoi les moteurs des voitures électriques sont des moteurs triphasés. Dans un moteur triphasé typique, le stator comporte trois bobines orientées à 120 degrés les unes des autres, et alimentées en courant alternatif avec des phases décalées de 120 degrés. L'ensemble induit un champ magnétique tournant. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers les bobines du rotor. Ces dernières se positionnent de façon à s'y opposer (loi de Lenz). Comme la direction du flux magnétique induit par les bobines du stator tourne sans cesse autour de l'axe du rotor, ce dernier tourne aussi.

Depuis l'avènement de contrôles par ordinateur toujours plus efficaces et d'électroniques >

Pour améliorer les moteurs électriques, les ingénieurs simulent en détail les comportements des champs magnétiques, des circuits électroniques et des matériaux.



> de puissance à faible coût, les ingénieurs ont obtenu avec ces moteurs plutôt simples et robustes des réactions à la commande meilleures encore que celles obtenues avec des moteurs à courant continu.

Le premier moteur triphasé construit était la « machine synchrone à excitation bobinée » que l'Allemand Friedrich August Haselwander développa en 1888 en modifiant un moteur à courant continu. Il ne nécessite pas d'aimants permanents coûteux, mais un rotor relativement complexe (voir l'encadré page 70). Un tel moteur équipe aujourd'hui par exemple la ZOE et la Kangoo Z.E., véhicules électriques de la marque Renault.

A peu près à la même époque a été inventé le premier moteur asynchrone. Son nom traduit un autre principe de fonctionnement : alors qu'une machine synchrone fonctionne à la fréquence de son champ magnétique tournant, un moteur asynchrone est construit de telle façon qu'il ne développe de couple que si son rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ tournant du stator. C'est l'Italien Galileo Ferraris qui introduisit ce concept, lors d'un exposé très remarqué en mars 1888, à Turin. Quelques mois plus tard, à New York, le Croate Nikola Tesla annonçait des principes similaires et fit fonctionner deux prototypes simples. Finalement, c'est le Russe Mikhaïl Dolivo-Dobrowolsky qui, à partir de 1889, développa au sein de la société allemande AEG le moteur asynchrone sous la forme que nous lui connaissons.

Aujourd'hui, presque tous les systèmes ferroviaires et les industries exploitent des

moteurs asynchrones. Le modèle S de la marque Tesla est aussi motorisé avec une machine asynchrone.

Le principe de moteur électrique le plus récent sur le plan historique est la machine synchrone à aimant permanent, qui n'a été pleinement développée qu'à la fin du siècle dernier, lorsque de puissants aimants à base de terres rares sont devenus disponibles. À poids égal, les moteurs à aimants permanents ont les meilleures performances, ce qui explique qu'ils motorisent aujourd'hui la plupart des voitures électriques. Ils sont particulièrement adaptés aux vitesses basses et moyennes, tandis que les moteurs asynchrones sont plus avantageux aux vitesses élevées. Un bon compromis entre les deux est offert par les moteurs synchrones à excitation bobinée déjà mentionnés, bien qu'ils soient un peu plus complexes à construire (leur rotor doit intégrer des bobines et deux bagues collectrices).

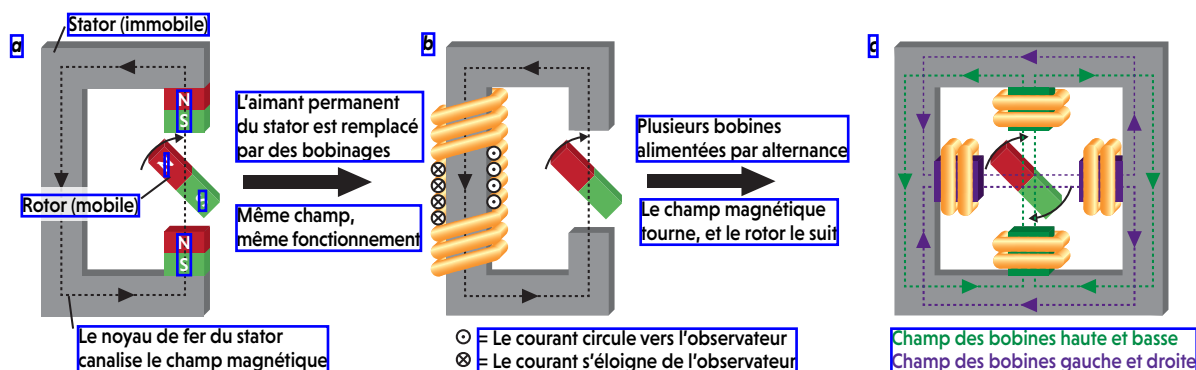
UN STATOR À CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT

Dans les moteurs triphasés, des courants alternatifs sinusoïdaux alimentent les bobines du stator. Typiquement, trois courants déphasés de 120 degrés alimentent trois bobines réparties autour de la circonférence du stator. La superposition des trois champs magnétiques associés produit un champ magnétique d'amplitude constante tournant de façon uniforme autour de l'axe du rotor. Comme celui qui traverse un aimant, ce champ résultant présente un pôle nord et un pôle sud. Afin de le rendre plus uniforme, on utilise souvent

LE PRINCIPE DU MOTEUR ÉLECTRIQUE MULTIPHASÉ

Les moteurs électriques exploitent les forces magnétiques pour transformer de l'énergie électrique, puis magnétique, en énergie mécanique. Soumis au champ magnétique d'un aimant permanent intégré au stator, un aimant permanent mobile (rotor) s'aligne avec ce champ (a). Le champ statorique peut aussi être créé par un électroaimant,

un bobinage où circule un courant continu et qui entoure un noyau de fer, lequel canalise le champ (b). Toutefois, dans ces deux configurations, le rotor s'immobilise une fois que les pôles se sont alignés. Pour le faire tourner, on peut placer sur le noyau une série de bobines alimentées par des courants alternatifs, déphasés de façon à créer un champ



pour chaque phase non pas une bobine, mais un groupe de deux ou trois bobines. De plus, les groupes ne sont pas déphasés de 120 degrés, mais plutôt de 90, voire de 60 degrés. Toute la circonférence du stator se retrouve alors occupée par des groupes de bobines, ce qui augmente le nombre de pôles magnétiques. On construit ainsi des machines asynchrones à deux paires de pôles (deux pôles nord et deux pôles sud) et des machines synchrones à trois ou quatre paires de pôles.

La force et, par conséquent, le couple et la puissance produits résultent du jeu qui s'établit entre le champ du stator et celui du rotor, qui constitue le « champ d'excitation ». C'est par l'intermédiaire de ce dernier que sont transmises les forces qui se développent. Une métaphore éclaire cette transmission: tout se passe comme lorsqu'un véhicule en tracte un autre tombé en panne à l'aide d'une corde. Ce lien, qui équivaut au champ d'excitation, doit avoir une grande résistance, laquelle équivaut à la densité d'énergie de ce champ. C'est pourquoi les trois types de moteurs à champ tournant se distinguent les uns des autres par la façon dont le champ d'excitation est engendré. Dans un moteur synchrone à aimants permanents, le champ d'excitation est créé par des aimants... permanents; dans un moteur synchrone à excitation bobinée, il est créé par des... bobines.

Il existe aussi ce que l'on nomme des moteurs électriques asynchrones à cage d'écureuil. Leur rotor n'est pas fait de spires enroulées, mais plutôt d'une cage cylindrique dont les barres de cuivre, disposées entre deux anneaux qui les court-circuitent, sont

« torsadées » (voir l'encadré page suivante). Lorsque ce dispositif est plongé dans le champ tournant (donc variable) du stator, des courants sont induits dans la masse conductrice des barres (ce que l'on nomme des courants de Foucault), de telle façon à créer un flux magnétique s'opposant au flux du stator; et comme ce flux tourne, la cage suit ce mouvement. Ce fonctionnement explique pourquoi les moteurs asynchrones sont aussi nommés moteurs à induction.

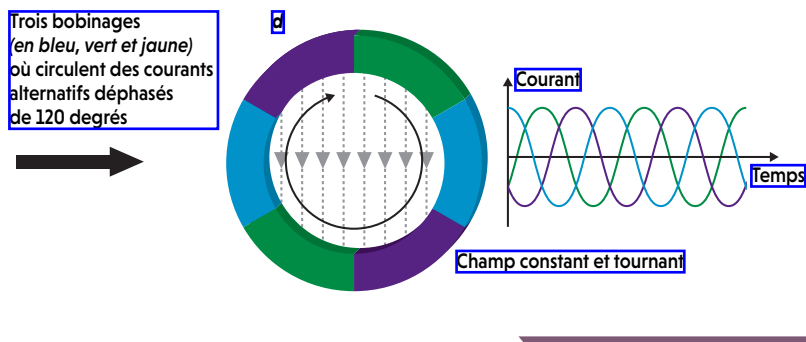
DES AIMANTS PERMANENTS DE PLUS EN PLUS PUISSANTS, À BASE DE TERRES RARES

Le développement des moteurs synchrones à aimants permanents n'a été possible que parce qu'au cours du siècle dernier, les chercheurs ont mis au point des matériaux à l'origine d'aimants permanents toujours plus performants. Le premier d'entre eux était l'alliage aluminium-nickel-cobalt (AlNiCo). Dès les années 1940, on lui faisait atteindre des densités d'énergie magnétique de 150 kilojoules par mètre cube. Cependant, en raison de sa faible coercitivité, c'est-à-dire du faible champ magnétique nécessaire pour annuler son aimantation, l'aluminium-nickel-cobalt ne convient pas à la construction de moteurs électriques. Arrivée dans les années 1960, la ferrite a une densité d'énergie quelque trois fois plus faible, mais sa coercitivité élevée la rend utilisable dans les moteurs électriques. Elle a aussi l'avantage d'être peu coûteuse, de sorte qu'on l'emploie souvent dans les moteurs synchrones à aimants permanents simples et dans les moteurs à courant continu.

Depuis les années 1970, les aimants à base de terres rares sont devenus de plus en plus puissants. On a d'abord utilisé des alliages samarium-cobalt (SmCo), qui atteignent une densité d'énergie de 300 kilojoules par mètre cube, puis, à partir de 1990, du néodyme-fer-bore (NdFeB), dont la densité d'énergie magnétique peut aller jusqu'à 450 kilojoules par mètre cube. La stabilité en température des aimants au néodyme oblige à utiliser aussi un autre élément, également une terre rare, le dysprosium, qui est environ dix fois plus cher que le néodyme. En raison du monopole de la Chine, qui est de loin le plus gros producteur mondial de terres rares, le prix du dysprosium a connu dans le passé de brusques embardées. C'est pourquoi de nombreux grands constructeurs automobiles se préparent à introduire des moteurs électriques sans aimant permanent, c'est-à-dire des machines synchrones à excitation bobinée ou à cage d'écureuil.

Une autre caractéristique critique des aimants au néodyme est leur teneur élevée en fer (60%), et l'oxygène atmosphérique peut donc les oxyder. Une fois les aimants produits,

magnétique tournant, mais d'amplitude constante (c). Soumis à ce champ, le stator tourne pour rester aligné avec lui. Pour ce faire, on utilise trois bobines réparties dans le stator et alimentées par des courants sinusoïdaux déphasés de 120 degrés (d).



LES TROIS ARCHITECTURES DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Les moteurs le plus souvent montés dans les véhicules électriques présentent diverses

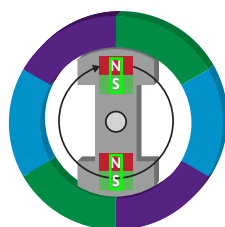
architectures. Mais dans tous les cas, un champ magnétique tournant fait tourner le rotor, dont le champ magnétique est créé de diverses façons.

Dans les moteurs synchrones à aimants permanents, le champ magnétique du rotor est créé par des aimants permanents (les représentations ci-dessous sont schématiques : les moteurs réels ont bien plus de paires de pôles magnétiques).

Dans les moteurs synchrones à excitation bobinée, le champ du rotor est produit par des bobines intégrées au rotor. Le courant d'alimentation nécessaire parvient aux bobines par l'intermédiaire de contacts coulissants, des « balais ».

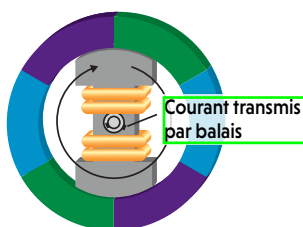
Dans les machines asynchrones, le champ du rotor est engendré par les courants qui circulent dans la masse des tiges métalliques dont est constitué le rotor. Le champ statorique tournant y crée une tension électrique, qui est court-circuitée par les anneaux constituant les extrémités de cette « cage d'écureuil ». Les courants qui la traversent engendrent le champ magnétique rotorique, dont le flux tend à s'opposer au champ statorique tournant. Il en résulte un couple de forces qui fait tourner la cage.

MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS



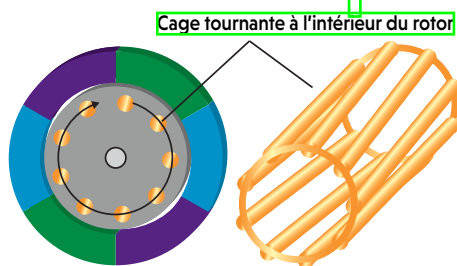
Le rotor comporte des aimants permanents.

MACHINE SYNCHRONE À EXCITATION BOBINÉE



Le rotor intègre des bobines.

MACHINE ASYNCHRONE



Le champ tournant du stator induit des courants dans le rotor, qui induisent son champ magnétique.

leur surface doit donc être soigneusement scellée, par exemple par une couche d'aluminium. Si ce revêtement est endommagé lors de l'installation du moteur, une panne prématurée de celui-ci peut survenir.

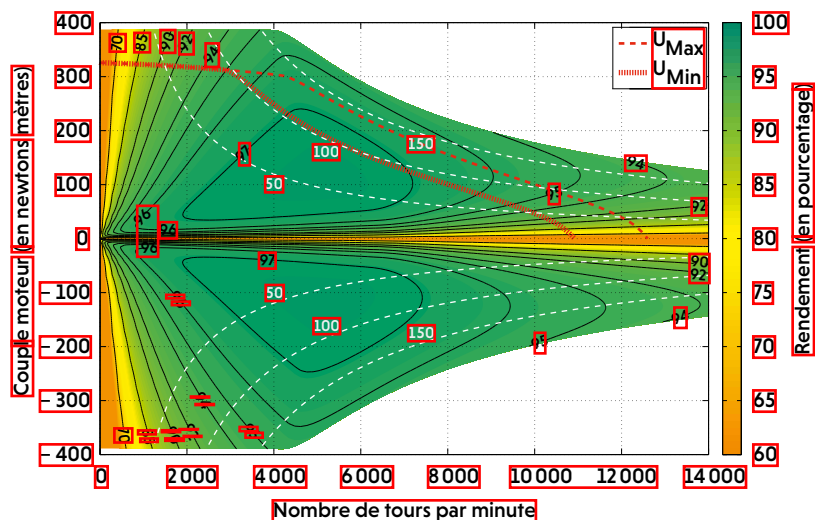
Un indicateur important de l'efficacité d'un moteur électrique est son rapport puissance/poids, déterminé par le poids nécessaire pour fournir une certaine puissance mécanique. Les moteurs industriels classiques – par exemple ceux des escaliers mécaniques, des ascenseurs, des systèmes de refroidissement et des compresseurs – pèsent environ 10 kilogrammes par kilowatt de puissance mécanique continue. Particulièrement robustes, ces moteurs peuvent fonctionner plusieurs décennies sans entretien, mais ils sont trop lourds pour motoriser des véhicules. De fait, dans les voitures ou les trains électriques actuels, les rapports poids/puissance des moteurs sont inférieurs à 1 kilogramme par kilowatt, valeurs comparables à celles des moteurs à explosion.

DES MOTEURS PLUS PUISSANTS QUE CEUX DE LA FORMULE 1

Des progrès ont cependant été réalisés, puisque des rapports poids/puissance de 0,1 kilogramme par kilowatt sont désormais possibles. De tels moteurs électriques sont plus puissants que les meilleurs moteurs à combustion interne utilisés en Formule 1. Outre les voitures, on prévoit qu'ils équiperont un jour les avions. Les ingénieurs n'envisagent pas seulement de petits appareils, mais aussi de petits porteurs de 50 à 100 passagers capables de couvrir jusqu'à 1 000 kilomètres. L'énergie électrique ne proviendra pas nécessairement de batteries, mais pourrait être produite par des générateurs, qui ont l'avantage d'avoir un rendement élevé dans la plage optimale des vitesses de rotation des moteurs.

L'entraînement fourni par un moteur électrique résulte non seulement de la force de Lorentz (la force qu'exerce un champ magnétique sur une charge en mouvement), mais aussi de la force de réluctance, qui mesure la résistance d'un circuit magnétique (un conducteur de champ magnétique refermé sur lui-même) à être traversé par un champ magnétique. Cette dernière joue un rôle dans les matériaux ferromagnétiques doux, ceux qui s'aimantent facilement quand on les plonge dans un champ magnétique extérieur. Ce type de matériau conduit bien les champs magnétiques et permet, à taille égale, de transférer davantage de puissance. C'est pourquoi, en général, un électroaimant ne comporte pas seulement une bobine engendrant un champ magnétique, mais aussi un noyau de matériau ferromagnétique qui canalise le champ et l'amplifie.

À cette fin, on utilise ce qu'on appelle le fer doux ou une «tôle magnétique», qui est pour



Le couple d'un moteur électrique dépend du nombre de tours par minute et de la tension de la batterie. Cette simulation du fonctionnement d'une machine synchrone à aimants permanents montre que, d'abord constant dans la plage des basses vitesses, le couple décroît après que la tension maximale de la batterie a été atteinte. Cela se produit plus vite si la batterie est déchargée (courbe U_{Min} en petits pointillés rouges) que si elle est chargée (courbe U_{Max} en gros pointillés rouges). Les lignes blanches indiquent la puissance disponible en kilowatts et les couleurs le rendement en pourcents. On constate que le rendement est en général supérieur à 90 %, tant lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur que lorsqu'elle fonctionne en générateur, pendant un freinage par exemple.

L'essentiel de l'acier allié à du silicium et à de l'aluminium. Ce matériau a une faible réluctance, de sorte qu'un faible courant dans la bobine suffit pour que le flux magnétique dans le noyau de fer doux soit élevé. La perméabilité magnétique relative (sa capacité à conduire les lignes de champ) du fer doux d'un moteur est, en fonction de son couple et de sa vitesse, environ 100 fois supérieure à celle de l'air. Cela signifie qu'à courant constant, la densité de flux magnétique (flux magnétique par unité de surface) y est quelque 100 fois supérieure à ce qu'elle est dans l'air. La tôle magnétique a malheureusement un défaut : au-dessus d'un certain courant d'induction, le flux magnétique n'y augmente plus.

C'est le flux magnétique, créé par la circulation du courant dans les bobines, qui engendre la force entraînant le moteur. Le couple créé résulte du produit de cette force par le bras de levier, ici la moitié du diamètre du rotor. Le produit du couple par la vitesse de rotation donne finalement la puissance mécanique fournie par le moteur.

DES RENDEMENTS DE 90 %

Toutes les machines électriques tournantes peuvent fonctionner dans les deux sens, donc autant comme moteur électrique que comme générateur d'électricité. Cette inversion permet de recharger la batterie du véhicule pendant les descentes et les phases de freinage qui précèdent l'arrivée devant un feu ou un bouchon. C'est pourquoi le rendement d'un moteur électrique bien conçu peut atteindre 90% et plus (voir le diagramme ci-dessus), alors que celui des moteurs à explosion ne dépasse pas 30%.

Comme les entraînements électriques convertissent déjà très bien l'énergie électrique en énergie mécanique, la recherche actuelle se concentre sur l'optimisation du rapport puissance/poids. Plus un moteur est léger, moins il

prend de place et moins il faut d'énergie pour accélérer la masse du véhicule.

Par exemple, le moteur électrique de la BMW i3 pèse environ 50 kilogrammes. Pour une puissance fournie en continu de 75 kilowatts, son rapport poids/puissance est de 0,67 kilogramme par kilowatt. Un prototype de haute performance développé à l'Institut de technologie de Karlsruhe pour propulser une voiture Audi A1 convertie ne pèse, lui, qu'environ 13 kilogrammes pour une puissance continue de 70 kilowatts. Son rapport poids/puissance n'est donc que de 0,19 kilogramme par kilowatt.

AUGMENTER LE FLUX MAGNÉTIQUE, LE COURANT OU LA VITESSE DE ROTATION

Trois voies s'offrent pour atteindre ces puissances élevées sans faire grossir le moteur : augmenter la densité de flux magnétique, alimenter les bobines avec des courants plus intenses ou faire tourner le moteur plus vite.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la densité du flux magnétique est limitée par la saturation de la tôle magnétique. Les meilleurs types de tôles ne sont disponibles qu'en petites quantités et à des prix élevés. Il s'agit d'alliages d'acier contenant du cobalt. On les utilise dans les compétitions automobiles, mais ils sont bien trop chers pour convenir aux voitures de série.

Quant à la solution consistant à augmenter le courant, elle a l'inconvénient de présenter des pertes par effet Joule, puisque les bobines sont en fils de cuivre, qui ont une résistance électrique. Il existe d'autres sources de pertes, en particulier dans la tôle magnétique qui est sans cesse magnétisée dans des directions opposées et où circulent des courants de Foucault. Mais dans les moteurs

> d'aujourd'hui, ce sont les pertes par effet Joule qui prédominent.

Le refroidissement joue donc un rôle crucial quant à l'intensité du courant électrique qui peut faire fonctionner un moteur sur une longue durée. Dans les moteurs actuels, le stator est à l'intérieur d'un boîtier dont les parois, creuses, sont traversées par de l'eau de refroidissement. Dans ceux que l'on développe, l'intérieur de l'arbre est aussi traversé par un liquide de refroidissement; ou un nuage de gouttelettes d'huile est pulvérisé sur les bobines à l'intérieur du moteur.

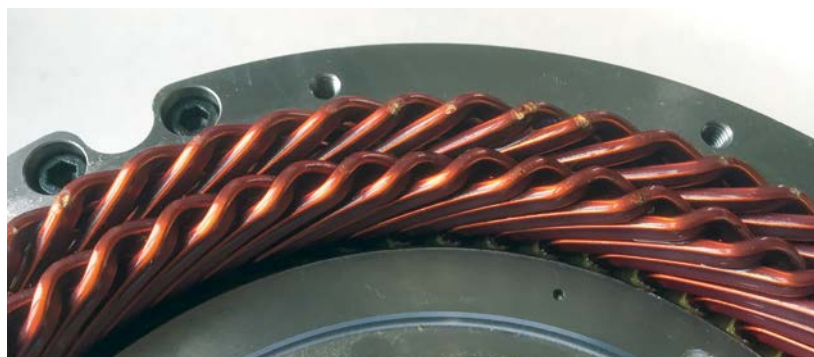
Dans les derniers systèmes en développement, on tente d'améliorer encore l'évacuation de la chaleur en amenant le liquide de refroidissement directement sur les conducteurs de cuivre, en la faisant passer par les interstices qui séparent les plaques dont est formé le stator. L'utilisation de fils conducteurs à section rectangulaire plutôt que ronde améliore aussi la compacité, c'est-à-dire qu'elle permet de disposer plus de cuivre par unité de surface (voir les photographies ci-contre). Toutes ces modifications posent des défis de conception et de production. Des prototypes existent déjà, mais on est encore loin d'une production en série.

ÉVACUER LA CHALEUR

Quelle que soit la solution technique adoptée, on ne peut évacuer qu'une certaine quantité maximale de chaleur. Ce maximum détermine la charge linéique, en d'autres termes la somme de tous les courants divisés par la circonférence du rotor. Les moteurs électriques modernes fonctionnent en régime continu avec des charges linéiques comprises entre 50 000 et 100 000 ampères par centimètre. S'agissant des pointes de charge linéique, celles qui se produisent pendant une accélération, on peut atteindre des valeurs de 200 000 ampères par centimètre. Lors des accélérations, la quantité de chaleur produite est stockée temporairement dans la pile de plaques statoriques, puis refroidie.

La troisième voie pour augmenter la puissance sans faire grossir le moteur consiste à augmenter la vitesse de rotation. Les moteurs industriels tournent, typiquement, jusqu'à 3 000 tours par minute. Les commandes de robots atteignent 6 000 tours par minute. Les moteurs des premières voitures électriques en phase de production fonctionnaient déjà à des vitesses deux fois plus élevées. Dans les systèmes développés actuellement, les vitesses sont plutôt de 20 000 tours par minute pour les moteurs produits en série, et vont jusqu'à 30 000 tours par minute pour certains prototypes.

Pour commander des moteurs à rotation aussi rapide, il faut disposer de tensions alternatives de fréquence élevée. La fréquence atteinte est actuellement de 1 kilohertz,



parfois plus. Ces valeurs sont obtenues en faisant hacher la tension continue, issue de la batterie, par des interrupteurs électroniques de puissance, dispositifs nommés onduleurs ou convertisseurs continu-alternatif. En pratique, on rencontre aujourd'hui couramment des fréquences d'horloge bien au-dessus des 10 kilohertz. Le contrôle n'est précis que si chaque impulsion de commutation est calculée avec précision par un ordinateur puissant, ce qui n'est devenu possible que depuis quelques années.

Il est peu probable que les vitesses dépasseront les 30 000 tours par minute. Tout d'abord, cette vitesse doit être ramenée, par des transmissions, aux quelque 1 500 tours par minute qui sont appliqués à la roue à la vitesse maximale. Par ailleurs, la structure du rotor doit résister à la force centrifuge. Selon les conceptions de rotor – à base d'aimants ou de cage d'écureuil – et les dimensions usuelles d'un moteur électrique (le noyau en tôles magnétiques du stator fait 20 à 30 centimètres de diamètre extérieur), la périphérie du rotor peut atteindre des vitesses de 100 à 150 mètres par seconde. De plus, les pertes dues à la remagnétisation constante du noyau de fer augmentent avec la vitesse, ce qui limite l'amélioration des performances.

Contrairement aux moteurs à combustion, les moteurs électriques créent à l'arrêt un couple puissant, qui suffit pour obtenir les nombres de tours par minute les plus élevés. Par conséquent, aucun embrayage ou boîte de vitesses à multiples rapports n'est nécessaire.

Les bobinages constituant le stator sont soit répartis (comme en haut), soit concentrés (comme en bas). Les bobinages répartis sont mieux adaptés aux machines tournant à grande vitesse. Presque tous les moteurs électriques puissants sont à bobinages répartis. Ceux qui sont particulièrement compacts mettent en œuvre des fils conducteurs à section carrée (en haut), forme qui permet de mieux occuper l'espace.

Cependant, la rotation de l'arbre moteur doit être ajustée, par un réducteur, à celle des roues. Cela se fait en général par des systèmes à deux étages de roues dentées. Compacts et moins volumineux que le moteur, ces réducteurs atteignent des rendements de plus de 90% grâce au petit nombre de pièces qui les composent.

On pourrait aussi construire des moteurs à rotation lente, entraînant directement les roues, mais ils auraient l'inconvénient d'une faible densité de puissance. À performances comparables, de tels entraînements directs devraient être plus volumineux, plus lourds et plus coûteux que des entraînements centraux à grande vitesse. Les grandes tailles de leurs composants auraient aussi l'inconvénient de réduire le rendement moteur à mesure que l'usure et le frottement augmenteraient. C'est pourquoi toutes les voitures électriques produites aujourd'hui fonctionnent avec des moteurs électriques rapides et une petite boîte de vitesses.

DES ENGRENAGES FIXES EN GÉNÉRAL

Certaines voitures électriques sont dotées de modificateurs de régimes, c'est-à-dire de plusieurs vitesses. C'est intéressant lorsqu'on souhaite combiner dans le même véhicule un couple de démarrage élevé avec une vitesse maximale élevée, ce qui est par exemple nécessaire dans les compétitions automobiles. Les engrenages nécessaires occupent trop de place et sont trop lourds, sans parler des pertes de puissance qu'ils occasionnent. Même le modèle S de Tesla, qui passe de 0 à 100 kilomètres par heure en 4,4 secondes et atteint une vitesse maximale de 225 kilomètres par heure, est livré avec des engrenages fixes.

Malgré les différences techniques entre les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à aimants permanents et les moteurs synchrones à excitation bobinée, les fonctionnements de tous ces dispositifs de propulsion électrique sont assez similaires.

Dans la plage des faibles nombres de tours par minute, donc des basses vitesses, les moteurs fonctionnent à flux magnétique constant, mais il faut ajouter de l'électronique pour le garantir. Dans le même temps, la quantité de chaleur évacuable et la puissance maximale du système de refroidissement limitent l'alimentation électrique totale possible. Le courant d'alimentation maximal et le flux magnétique sont donc constants dans la plage des basses vitesses, ainsi que le couple maximum atteignable (voir le diagramme page 71).

La puissance du moteur est égale au produit du couple par la vitesse de rotation. La puissance disponible augmente donc dans la plage des basses vitesses de 0 (à l'arrêt) jusqu'à un maximum, atteint pour la vitesse de

rotation maximale. La plupart du temps, elle correspond à des vitesses du véhicule comprises entre 40 et 60 kilomètres par heure, selon le type de moteur.

Au-delà de la vitesse maximale, on entre dans la plage des faibles champs. Le variateur – le composant qui dicte à chaque instant au moteur la fréquence de la tension alternative appropriée, exploite désormais toute la tension disponible aux bornes de la batterie. La fréquence augmente encore proportionnellement à la vitesse. Cependant, comme le flux magnétique varie comme le rapport tension/fréquence, il tend à diminuer. Le courant continu thermiquement admissible reste le même. Pour ces raisons, le couple diminue en raison inverse du nombre de tours par minute, tandis que la puissance mécanique disponible – produit du couple par la vitesse de rotation – reste constante.

Par ailleurs, la tension de la batterie diminue au fur et à mesure qu'elle se décharge. Les batteries typiques des véhicules produits en série aujourd'hui fournissent un maximum de 360 volts à pleine charge. La tension chute à 320 volts ou même à 300 volts lorsque la batterie est presque vide. Cela a un impact important sur le comportement du moteur. À tension plus basse, la plage de vitesses de base se termine à des vitesses plus basses, et la plage d'affaiblissement du champ commence plus tôt. La puissance maximale disponible diminue alors avec la tension disponible. Cette puissance disponible à plein régime s'affiche sur les tableaux de bord de certains véhicules électriques, telle la ZOE de Renault.

Au cours des deux dernières décennies, les ingénieurs ont exploité toutes ces possibilités de réglage du fonctionnement des systèmes de propulsion électrique afin de rendre les moteurs électriques suffisamment efficaces – en tout cas par rapport à leurs prédécesseurs industriels – pour être utilisés dans les voitures particulières. Des vitesses plus élevées, de meilleures solutions de refroidissement, des aimants plus puissants, une électronique moderne et la commande par ordinateur ont permis d'améliorer le rapport puissance/poids d'un facteur 10.

Les systèmes actuellement à l'essai dans les laboratoires et ceux développés pour la compétition suggèrent qu'une amélioration d'un autre ordre de grandeur sera possible. Par exemple, les semi-conducteurs en carbure de silicium devraient apporter bientôt de grandes améliorations aux électroniques de puissance, car ils résistent à des températures plus élevées, présentent de plus faibles pertes ainsi que des temps de commutation plus courts. À n'en pas douter, les systèmes de propulsion électrique de demain seront encore plus compacts et plus puissants. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Dopplebauer et P. Winzer, **A lighter motor for tomorrow's electric car**, *IEEE Spectrum*, vol. 54(7), pp. 26-31, 2017.

A. Hughes et B. Drury, **Electric Motors and Drives**, Newnes, 4^e édition, 2013.

R.-P. Bouchard et G. Olivier, **Conception de moteurs asynchrones triphasés**, Presses internationales Polytechnique, 1999.

J.-D. Chatelain, **Machines électriques**, Bordas, 1993.

Des chercheurs pris dans la guerre biologique

Que feriez-vous si le gouvernement vous demandait d'effectuer des recherches visant à défendre les populations contre des épidémies intentionnelles?

Au cours du xx^e siècle, nombre de chimistes et biologistes civils, confrontés à cette question, ont accepté de collaborer secrètement, même si cela signifiait souvent aussi développer et produire les armes biologiques à combattre.

En janvier dernier, le virologue David Evans et son équipe de l'université d'Alberta, au Canada, indiquaient, dans la revue *PLoS One*, qu'ils avaient réussi à produire, à petit budget, une variante du virus de la variole. Conçue sur la base de séquences d'ADN trouvées sur Internet – qui provenaient du virus responsable de la forme chevaline de la variole –, l'initiative visait à produire un vaccin plus efficace contre cette maladie. Six mois plus tôt, la revue *Science* mettait déjà en garde contre cette recherche, alors en cours, qui pouvait donner l'occasion à des terroristes de produire à peu de frais des armes biologiques.

De fait, depuis que la période de l'après-Guerre froide a sonné le glas de la bipolarité politique du monde, ce que l'on nomme aujourd'hui le bioterrorisme préoccupe les États, particulièrement depuis l'épisode dit des « lettres à l'anthrax », au cours duquel, en octobre 2001,

diverses institutions, dont des rédactions de journaux, avaient reçu des lettres contenant des bacilles de la maladie du charbon.

Certes, dès les premières décennies du xx^e siècle, les États qui en avaient les capacités s'étaient lancés dans une course aux armements biologique et chimique, mais de nos jours, un nouvel aspect est venu renforcer l'inquiétude des dirigeants à ce sujet : la crainte de voir émerger des capacités de destruction sortant du cadre étatique. Le très grand nombre de canulars et les tentatives avérées de bioterrorisme des trente dernières années – dont celles des sectes Rajneesh à The Dalles, dans l'Oregon, en 1984 et Aum à Kameido, au Japon, en 1993 –, conjointement avec la fin de la Guerre froide et l'avènement d'Internet, laissent penser que l'arme biologique, l'arme atomique du pauvre comme la surnomment souvent les militaires, représenterait une menace sans précédent.

Le fait qu'une revue scientifique alerte sur les risques bioterroristes liés à une étude montre

L'ESSENTIEL

> Dès le début du xx^e siècle, la France a développé des armes biologiques grâce à l'expertise de chimistes et biologistes civils.

> Auguste Trillat, chef du service des recherches appliquées à l'hygiène à l'institut Pasteur, joua ainsi un rôle clé dans la création du programme français

d'armement biologique et chimique après la Première Guerre mondiale.

> Ces recherches, menées dans le plus grand secret, ont conduit à des essais en grandeur nature, notamment en Algérie.

L'AUTEUR



ETIENNE AUCOUTURIER
docteur en philosophie (université Paris-I), historien et philosophe des sciences et des techniques, enseignant en philosophie (académie de Versailles)



Dès la Première Guerre mondiale, des gaz toxiques faisaient couramment partie de l'arsenal de guerre, comme ici le phosgène ou dichlorure de carbonyle, que l'armée allemande a répandu pour couvrir son déplacement vers les tranchées britanniques, vers 1916. Les armes bactériologiques existaient aussi, mais étaient beaucoup moins utilisées.

que le monde scientifique a fait siennes ces craintes. Mais cela n'a pas toujours été le cas. Si dès les années 1950, profondément marqués par l'emploi de la bombe atomique, les physiciens du domaine ont pris acte des enjeux éthiques et politiques de leurs recherches, pendant ce temps, les chimistes, biologistes et médecins concernés par l'usage militaire de leurs travaux ne dénonçaient que marginalement les recherches sur les armes biologiques et chimiques, sans doute à cause de leur caractère plus secret et des usages moins catastrophiques ou spectaculaires qui en étaient faits.

Pourtant, ces armes ont été développées et utilisées dès le début du ^{xx}^e siècle, soit bien avant l'arme nucléaire, et ce grâce à l'expertise scientifique et médicale de nombre d'entre eux. Un minutieux travail de recherche dans les archives militaires françaises, mais aussi dans d'autres fonds comme les archives de la direction de l'institut Pasteur, nous a en effet récemment permis de montrer que, en France, ces armes ont fait l'objet d'une collaboration continue des militaires avec des scientifiques et médecins civils, membres d'institutions de premier plan.

DU ROQUEFORT AUX NUAGES ARTIFICIELS

La France a été pionnière dans le domaine des armes biologiques et chimiques. Dès la première décennie du ^{xx}^e siècle, un chimiste français renommé, Auguste Trillat, inventeur du formol quelques années auparavant, brevetait certes un procédé de fabrication industrielle du roquefort, mais posait aussi les bases de la production intentionnelle d'épidémies à l'aide de nuages artificiels microbiens.

Bien avant la Première Guerre mondiale, le pays avait entrepris des recherches à visée militaire sur les armes chimiques. Mais c'est pendant cette guerre que les Français, puis les Allemands, firent pour la première fois usage de gaz de combat. Les armes dites biologiques furent elles aussi utilisées, mais de façon marginale, plutôt en tant que moyens de sabotage (pour tuer du bétail ou des animaux de transport) qu'en tant qu'armes de destruction massive, ou visant massivement les humains. Néanmoins, la menace de guerre bactériologique que ces attaques rendaient plus tangible fit avancer les recherches sur les méthodes de désinfection et de prophylaxie (l'ensemble des mesures à prendre pour prévenir les maladies). Trillat, devenu en 1905 chef du service des recherches appliquées à l'hygiène de l'institut Pasteur, à Paris, joua ainsi un rôle fondamental dans la création du programme français d'armement biologique et chimique après la Première Guerre mondiale.

En 1922, lui qui avait été pionnier tant dans la production de nuages artificiels déclencheurs



d'épidémies, pour lesquelles il avait étudié les conditions atmosphériques propices à leur développement, que dans la recherche de méthodes de désinfection chimique à grande échelle, fut sollicité pour donner les lignes directrices de ce nouveau programme, sous la forme d'un rapport commandé l'année précédente par le ministère de la Guerre. Dès lors s'installa une collaboration continue entre institutions de recherche civiles et militaires. Les recherches sur les armes chimiques et biologiques requérant des compétences et des équipements similaires, les institutions et chercheurs mobilisés travaillaient en commun sur les deux systèmes, qu'il s'agisse de la recherche, du développement ou de la production.

L'institut Pasteur, ainsi que de nombreuses institutions scientifiques et médicales françaises de premier plan, dont le Muséum national d'histoire naturelle et le Collège de France, participèrent à ce programme par l'intermédiaire de certains de leurs membres éminents, comme les chimistes Charles Moureu (Collège de France), Marcel Delépine (faculté de pharmacie) et André Job (Conservatoire national des arts et métiers), travaillant sous contrats secrets avec la sphère militaire.

Dans le monde, la crainte que les guerres du futur voient s'amplifier le caractère de guerre totale qu'avait pris la Grande Guerre conduisit les principales nations occidentales, mais aussi le Japon, à préparer en temps de paix, dès l'entre-deux-guerres, les moyens de défendre – et d'attaquer – non plus seulement les combattants, mais les populations de nations entières. À cette même époque, des rumeurs issues de la presse britannique sur des essais secrets de dispersion d'agents biologiques effectués par des agents secrets allemands dans le métro parisien achevèrent de convaincre

LA POUDRERIE DU BOUCHET

Dès les années 1920 (et encore aujourd'hui), la poudrerie du Bouchet, dans le sud de Paris, fut un des principaux centres de recherche sur les armes biologiques. Dans les années 1960, par exemple, le Centre d'études du Bouchet avait pour attributions l'étude de la contamination par terrains et par aérosols, la lyophilisation de toxines, les études d'armement (production d'aérosols microbiens ou d'agents incapacitants, étude de solutions microbiennes...), la détection et la protection.

ARMES CHIMIQUES ET ARMES « BIO »

Aujourd'hui, la terminologie militaire établit une distinction entre les armes chimiques et les armes biologiques, fondée sur les substances utilisées. Cette distinction à des visées juridiques et tactiques. Les deux types d'armes ne sont pas interdits de la même manière ni depuis la même époque, et leur usage diffère. Pourtant, ils n'ont pas toujours été dissociés.

Parmi les textes de loi emblématiques à ce sujet, au milieu du XIX^e siècle, pendant la guerre de Sécession, fut adopté le code *Lieber* (1863) qui interdit, entre autres pratiques cruelles, l'usage de poisons dans la guerre. Mais à l'issue de la Première Guerre mondiale, une légère nuance est apparue dans le *Protocole de Genève* (1925) : il spécifia qu'il était interdit

d'utiliser des gaz asphyxiants, toxiques ou similaires et des moyens bactériologiques. Cette dissociation juridique en germe devint effective dans la seconde moitié du XX^e siècle, avec la signature en 1972 de la *Convention sur l'interdiction de la mise au point, de la fabrication et du stockage des armes bactériologiques (biologiques) ou à toxines et sur leur destruction*. Les armes chimiques sont ainsi demeurées sans interdiction spécifique autre que celle du *Protocole de Genève* jusqu'en 1993, lorsque la *Convention sur l'interdiction de la mise au point, de la fabrication, du stockage et de l'usage des armes chimiques et sur leur destruction* fut adoptée.

Qu'est-ce qui distingue fondamentalement ces deux types d'armes ? Les toxines biologiques (la ricine, par exemple) étant fonctionnellement équivalentes à des armes chimiques, la distinction juridique est faite en vertu de leur origine. Les toxines biologiques sont ainsi qualifiées de biologiques en ce qu'elles ne sont pas des produits de la synthèse chimique, mais sont trouvées telles quelles dans la nature. Elles sont issues du vivant. Il en est de même des autres agents biologiques : bactéries, virus, champignons, et autres agents pathogènes non synthétiques sont inclus dans la catégorie des armes de guerre biologique. D'un point de vue juridique, les armes biologiques sont donc comparables... aux produits alimentaires dits « issus de l'agriculture biologique ». En revanche, toute reproduction de toxine biologique par chimie de synthèse relève du droit des armes chimiques...

Ainsi, la subdivision juridique des poisons prévus pour un usage guerrier est discutable à bien des égards. Elle a vraisemblablement eu pour fonction de permettre aux États concernés, dans la seconde moitié du XX^e siècle, de poursuivre des recherches, développements et productions d'armes chimiques en toute liberté.

E. A.

L'opinion publique et l'État français de la nécessité de prendre au sérieux cette menace. La réorganisation de la France en nation armée, souhaitée au plus haut niveau de l'État, conduisit à la production de moyens offensifs et défensifs de guerre chimique, biologique, puis, après la Seconde Guerre mondiale, nucléaire.

L'ACTIVITÉ SECRÈTE DE LA POUDRERIE DU BOUCHET

La poudrerie du Bouchet, à Vert-le-Petit, au sud de Paris dans l'actuelle Essonne, devint graduellement le centre névralgique d'un réseau de recherche et développement d'armes biologiques et chimiques, incluant d'autres institutions civiles et militaires. Elle demeure de nos jours, sous le nom de Centre d'études du Bouchet, le centre du ministère des Armées dédié à la défense contre les menaces biologiques et chimiques, et l'un des rares sites en France (et dans le monde) à disposer d'un laboratoire de niveau de sécurité P4. Peu à peu, la France rassembla ainsi secrètement, sous l'appellation d'armes spéciales, un arsenal de nouveaux moyens offensifs et défensifs, étudiés et développés avec l'apport constant de l'expertise scientifique et médicale civile.

En 1947, une Commission médicale de défense contre la guerre moderne vit le jour afin de mieux centraliser les études relatives aux armes spéciales, de reconstruire une défense nationale incluant ces armes et de tirer parti des recherches scientifiques civiles ainsi que des renseignements issus des réseaux scientifiques internationaux de chercheurs. Mixte, cette commission était composée de militaires et de savants de premier plan, pour beaucoup médecins des facultés de médecine ou chercheurs de l'institut Pasteur. Entre autres membres, Léon Binet, doyen de la faculté de médecine de Paris, Robert Debré, président de l'Institut national d'hygiène, ou Jacques Tréfouël, directeur de l'institut Pasteur, prenaient part aux discussions secrètes de la commission et répondaient secrètement à diverses commandes militaires. Les laboratoires civils entreprirent ainsi une grande diversité d'études sur, par exemple, le mode d'action des trilons (les gaz neurotoxiques Sarin, Tabun et Soman), la possibilité de vacciner contre la radioactivité ou encore celle de potentialiser les effets délétères d'aérosols de bacilles du charbon en les combinant avec des métaux lourds.

Les décennies suivantes, l'ouverture à la sphère civile des recherches sur les armes spéciales se referma partiellement, le gouvernement préférant concentrer ses forces sur l'arme nucléaire. Mais de nombreux chercheurs continuèrent de travailler sur financement militaire, à des fins prophylactiques ou non, leur expertise demeurant indispensable, s'agissant par exemple des études sur la polyvaccination. >

À titre indicatif, en 1967, le nombre d'animaux de laboratoire destinés en France à l'expérimentation d'agents chimiques et biologiques de guerre (20 000 souris, 20 000 rats, 5 000 cobayes, 2 000 lapins et 50 singes) représentait 10 % de l'utilisation actuelle par an d'animaux à des fins scientifiques.

Outre la motivation patriotique mise en avant par certains scientifiques pour justifier leur collaboration à ces programmes, la relation mutuellement bénéficiaire entre l'armée et les hommes de science en France explique sa pérennité. Ainsi, en 1972, Jacques Monod, alors directeur de l'institut Pasteur, écrivait au ministre de la Défense nationale Michel Debré qu'il serait souhaitable de renforcer et formaliser les liens entre l'armée et l'institut Pasteur, qui formait alors selon lui « la quasi-totalité des médecins-biologistes de l'armée ».

DES ESSAIS MYSTÉRIEUX EN ALGÉRIE

Les armes testées au moins depuis les années 1930 à l'ouest du Sahara algérien (ainsi que dans certains centres d'expérimentation métropolitains, notamment près de Bourges) continuèrent de l'être jusqu'à la fin des années 1970. Notamment, on fit exploser des obus, roquettes et grenades chargés en agents biologiques ou chimiques pour mesurer leurs effets en situation réelle. La nature exacte et l'étendue des essais effectués secrètement en Algérie dans les deux décennies qui suivirent les accords d'Évian (1962) demeurent à ce jour peu connues et font donc régulièrement l'objet de spéculations légitimes de la part des populations concernées, craignant que les sites n'aient pas été parfaitement dépollués. Néanmoins ces essais ont eu lieu et ont participé de l'expertise française dans le domaine des armes chimiques et biologiques.

Ainsi, de l'aube du ^{xx}e siècle au début des années 1970, la France a développé et produit, à des échelles variables selon les époques et les priorités politico-militaires, des poisons synthétiques ou non, destinés, d'une part, à être utilisés en temps de guerre contre les hommes, les animaux et les plantes, mais aussi, d'autre part, à tester leurs effets à grande échelle pour mieux s'en prémunir en situation opérationnelle.

Les autres nations développées n'ont pas été en reste au cours du ^{xx}e siècle. Le Royaume-Uni, le Japon, les États-Unis, l'URSS, le Canada, les Pays-Bas, Israël, l'Afrique du Sud et d'autres ont aussi eu, à des fins diverses et des échelles variables, leur programme de guerre biologique et chimique. Le Japon, lorsqu'il occupait la Mandchourie avant la Seconde Guerre mondiale, a par exemple effectué de cruels essais sur les populations chinoises locales. Les États-Unis ont, à l'issue de cette guerre, secrètement récupéré les données que les Japonais avaient récoltées. Et,

LES NUAGES ARTIFICIELS D'AUGUSTE TRILLAT

« Il fit cette découverte curieuse que les microbes en suspension dans

l'atmosphère deviennent des noyaux de condensation de gouttelettes qui restent en suspension plus ou moins longtemps, se multiplient dans certains gaz tels que l'air des égouts, sont entraînés par les courants ou par les mouvements giratoires, se rassemblent et peuvent, dans des conditions de pression ou de dépression atmosphérique précisées par lui, se déposer sur les viandes ou sur d'autres substances alimentaires et en déterminer la putréfaction.

M. Trillat a pu établir ainsi les relations qui existent entre la marche des épidémies et les influences météorologiques. Il a réalisé expérimentalement la transmission à distance de certaines épidémies aux animaux en faisant varier l'action du froid, de la pression barométrique et de l'électricité. Tout récemment il a étendu ces expériences, par de très ingénieux dispositifs, à la production de nuages artificiels chargés de substances curatives pour produire chez ces derniers les réactions d'immunité.

[...] Enfin, pendant la guerre, M. Trillat a collaboré très utilement à la défense nationale, notamment par ses recherches sur la production de nuages artificiels qui ont été largement utilisés par les marines et les armées alliées, tant pour la protection des navires contre les attaques des sous-marins allemands que pour cacher à l'ennemi les mouvements des troupes. »

Rapport sur la candidature de M. Trillat [à l'Académie de médecine], Archives de l'institut Pasteur, 1937

SUR LE WEB

Un site très détaillé consacré aux recherches à visée militaire sur les armes chimiques guerredesgaz.fr

Wild Wild Country (2018) Une série documentaire sur la secte de Rajneesh et l'attaque bioterroriste qu'elle commit aux États-Unis en 1984 <https://bit.ly/2M4Bbil>

dans le cadre de la Guerre froide, l'URSS serait aussi entrée en lice avec son ambitieux programme *Biopreparat*, selon des transfuges russes tels que Ken Alibek ou Vladimir Pasechnik.

Parmi les scientifiques, mais aussi les militaires, il semble qu'un consensus ait perduré quant à la nécessité de maintenir une forme de politique de santé publique secrète pour défendre les populations contre les armes biologiques et chimiques. En France comme ailleurs, cependant, cette dimension avouable de leur action était contrebalancée par une contribution simultanée à des programmes souvent offensifs. Cette forme de politique de « santé publique inversée » – selon l'expression d'un de ses critiques de la fin des années 1960, le Britannique Robin Clarke – a placé les scientifiques et médecins devant un dilemme moral : collaborer secrètement avec les armées de leur pays pour prémunir des populations civiles contre des épidémies intentionnelles, au risque de contribuer en même temps à les doter de moyens offensifs en pratiquant des recherches non divulguées sur des agents pathogènes naturels ou synthétiques. Il semblait ainsi irresponsable de refuser cette collaboration autant qu'il l'était de l'accepter, et tout aussi irresponsable de publier les résultats des recherches comme de ne pas les publier. La réponse récurrente des scientifiques à ce dilemme, en France au moins, a majoritairement consisté à jouer le jeu du secret.



De même, rares ont été les avocats de l'usage des sciences biomédicales pour la guerre. Si quelques scientifiques comme le généticien britannique John Burdon Sanderson Haldane, dans les années 1920, ou des militaires tels que le brigadier général Jacquard Hirshorn Rothschild, après la Seconde Guerre mondiale, ont entrevu dans l'utilisation des connaissances en physiologie un moyen de rendre la guerre plus humaine (en introduisant la possibilité d'utiliser des agents non létaux plutôt que des armes conventionnelles aux effets moins prévisibles, comme les explosifs), la sélection précise des effets physiologiques des armes est demeurée une inclusion contre-nature de la science et de la médecine dans la guerre (tandis que des armes conventionnelles aux effets moins prévisibles sont restées autorisées).

Aujourd'hui, les armes biologiques et chimiques continuent de faire l'objet d'un dilemme moral récurrent pour la biomédecine. On ne s'improvise pas savant militaire: les chercheurs se lancent rarement dans une carrière médicale ou scientifique en vue de produire des systèmes d'arme ou de prémunir les populations nationales contre des armes biologiques et chimiques. Aussi la sphère militaire a-t-elle toujours besoin de l'expertise de chercheurs civils et continue-t-elle, selon les périodes, à les inclure secrètement dans des programmes militaires ou à financer des travaux d'intérêt militaire.

La responsabilité des chercheurs civils est d'autant plus grande que sans expertise physiologique, la distinction entre les agents chimiques ou biologiques bénins et malins est impossible. La connaissance précise du fonctionnement du corps (humain, mais aussi d'autres animaux ou de végétaux) et de ses

Cette photographie remonte à 1916, mais même en temps de paix, en France, pendant des années, des terrains sans habitants, notamment près de Bourges, ont servi de lieux d'expérimentation d'armes chimiques et biologiques.

BIBLIOGRAPHIE

E. Aucouturier, **La Guerre biologique. Aventures françaises, Matériologiques**, 2017.

E. Aucouturier, **Biological Warfare. Chemical Warfare and the Public Body**, dans A. Mankoo et B. Rappert, **Chemical Bodies: The Techno-Politics of Control**, Rowman & Littlefield International, 2018.

J. Guillemin, **Hidden Atrocities: Japanese Germ Warfare and American Obstruction of Justice at the Tokyo Trial**, Columbia University Press, 2017.

J. Guillemin, **Biological weapons: from the invention of state-sponsored programs to contemporary bioterrorism**, Columbia University Press, 2005.

P. Binder, **Les Armes biologiques**, PUF, 2001.

interactions avec des substances ou agents exogènes est essentielle pour caractériser une substance ou un agent comme un poison. À tel point que les armes biologiques et chimiques devraient être rassemblées sous un même terme, «armes physiologiques», qui insisterait plus sur la sélectivité de leurs effets que sur le moyen utilisé pour les obtenir.

ET DEMAIN?

Sauf à adopter une anthropologie optimiste fondée sur une confiance universelle, il semble difficilement pensable qu'un État soucieux de la sécurité de sa population et du droit humanitaire international ne cherche pas à mobiliser ses scientifiques en vue de secrètement préparer sa défense, donc en effectuant des recherches sur un maximum d'agents malins et sur leurs antidotes. Il résulte de cette tension entre la vocation universaliste de la science et les circonstances politiques qu'il reste difficile de nos jours de distinguer les recherches à vocation défensive de celles à vocation offensive: se défendre contre des poisons implique en effet d'en disposer afin de trouver des antidotes. Et par conséquent d'anticiper les menaces en maintenant une recherche biomédicale et militaire de pointe. Si le cadre législatif international tend à préserver un *statu quo* entre les États, comme c'est le cas de la dissuasion nucléaire, le cadre géopolitique de l'après-Guerre froide tend quant à lui à laisser planer la menace d'une utilisation moins prévisible ou identifiable de ces armes empoisonnantes par des groupes privés ou non étatiques.

Cela d'autant que les avancées scientifiques et techniques des dernières décennies – notamment Internet, les nanotechnologies et l'utilisation des *big data* en médecine – sont susceptibles de conférer à des États comme à des entités privées des moyens de guerre biologique sans précédent, en accroissant la possibilité de sélectionner précisément les effets physiologiques ainsi que les éventuelles populations cibles.

Par exemple, nombre d'hôpitaux sont aujourd'hui dotés de biobanques où sont stockées et parfois partagées à grande échelle les données de patients consentants (notamment génétiques) et leurs échantillons biomédicaux. Ces biobanques constituent une avancée considérable pour la recherche biomédicale. Néanmoins, elles présentent aussi le risque qu'à la faveur d'une instabilité politique d'un État y ayant accès ou d'une privatisation de leur gestion (que l'OCDE préconise depuis 2001), le rêve d'un partage global des progrès de la biomédecine ne se transforme en un cauchemar militaro-industriel. Il est donc plus que jamais nécessaire que les citoyens s'emparent de la question de la guerre biologique, dont les enjeux relèvent tant de la sécurité militaire que des sécurités sanitaire et alimentaire. ■

R

ENDEZ-VOUS

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

L'ART ET LA SCIENCE DES MOTS DE PASSE

Choisir les mots de passe, les garder en les protégeant, réussir à les dévoiler: la science des mots de passe est un trésor de subtilités.

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)



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

Nous utilisons tous des mots de passe pour protéger nos comptes, notre messagerie électronique, nos accès à des sites particuliers, nos ordinateurs, téléphones, etc.

Souvent, quand nous choisissons un mot de passe, le système le refuse en nous indiquant que notre choix est trop simple et cela nous agace. Parmi les conseils donnés, il y a celui de ne pas écrire les mots de passe sur un papier à côté de l'ordinateur. Il faut aussi renoncer à utiliser le même mot de passe sur plusieurs sites internet, en changer régulièrement et... ne pas l'oublier.

Pour bien comprendre tout cela, un peu de bon sens suffit-il? Que nenni! Savez-vous pourquoi 6 caractères ne sont pas assez pour un bon mot de passe et pourquoi il ne faut pas utiliser que des minuscules? Savez-vous qu'il existe des méthodes permettant de stocker indirectement des mots de passe sur un serveur informatique qui, même s'il est visité par un hacker, empêcheront celui-ci de tirer profit de ce qu'il trouve? Savez-vous qu'entre «faire beaucoup de calculs» et «mémoriser beaucoup de données», on peut trouver des compromis et ainsi réussir à casser des mots de passe sinon inaccessibles? Comprendre tout cela sera notre but.

Quand on vous demande un mot de passe, il se situe dans un certain espace de possibilités dont il faut avoir conscience de la taille. Si l'on

choisit 6 lettres minuscules pour son mot de passe, par exemple «afzjxd», «tonton», «secret», «wwwwww», l'espace comporte $26^6 = 308915776$ possibilités. Il y a en effet 26 choix possibles pour la première lettre, 26 choix possibles pour la deuxième, etc. Ces choix sont indépendants, on ne vous impose pas que toutes les lettres soient différentes, et donc la taille de l'espace des mots de passe est le produit des possibilités, ce qui donne $26 \times 26 \times 26 \times 26 \times 26 \times 26 = 26^6$.

DE LA COMBINATOIRE

Si vous choisissez un mot de passe de 12 caractères pris parmi les majuscules, les minuscules, les 10 chiffres et les 10 symboles & é \$? ç ù œ / + =, il y a 72 possibilités pour chacun des 10 signes du mot; l'espace des possibilités a alors pour taille 72^{12} , soit:

$19408409961765342806016 \approx 19 \times 10^{21}$.

C'est plus de 62000 milliards de fois plus que la taille du premier espace. Envisager un à un tous les mots de passe du second espace prendra 62000 milliards de fois plus de temps. S'il fallait à votre ordinateur une seconde pour visiter le premier espace, il lui faudrait deux millions d'années pour examiner chacun des mots de passe du second espace: la multiplication des possibilités a rendu impraticables certaines opérations envisageables sur le premier espace.

Pour mesurer la taille de ces espaces, il est courant de compter le nombre de chiffres binaires

COMBIEN DE TEMPS POUR PARCOURIR L'ENSEMBLE DES MOTS DE PASSE?

1

Pour qu'un mot de passe soit difficile à trouver, il faut le choisir uniformément dans un grand espace de possibilités. Selon la longueur A de la liste de caractères autorisés pour le composer et selon le nombre N de symboles qui composent le mot de passe, la taille $T = A^N$ de cet espace varie considérablement. Voici cinq exemples.

Dans chacun des exemples, on précise A , N , T et le nombre D d'heures qu'il faut pour explorer l'espace des possibilités, suivi du nombre X d'années qu'il faudrait attendre, en supposant que la loi de Moore (« doublement de capacité de calcul tous les deux ans ») reste toujours valide, pour que cet espace

devienne explorable en moins d'une heure. On prend comme point de départ l'hypothèse qu'en 2018 votre machine explore un milliard de possibilités par seconde. On a donc :

$$T = A^N, D = T / (10^9 \times 3\,600), \\ X = 2 \log_2 [T / (10^9 \times 3\,600)].$$

$A = 26, N = 6$
 $T = 308\,915\,776$
 $D = 0,000\,085\,8$ heure de calcul
 $X = 0$ année d'attente

$A = 26, N = 12$
 $T = 9,5 \times 10^{16}$
 $D = 26\,508$ heures de calcul
 $X = 29$ années d'attente

$A = 100, N = 10$
 $T = 10^{20}$
 $D = 27\,777\,777$ heures de calcul
 $X = 49$ années d'attente

$A = 100, N = 15$
 $T = 10^{30}$
 $D = 2,7 \times 10^{17}$ heures de calcul
 $X = 115$ années d'attente

$A = 200, N = 20$
 $T = 1,05 \times 10^{46}$
 $D = 2,7 \times 10^{33}$ heures de calcul
 $X = 222$ années d'attente



du nombre N de possibilités. Ce nombre est donné par la formule $1 + \text{partie entière}(\log_2(N))$. Pour le premier exemple, la mesure donne 29 bits, et pour le second 75 bits. On parle aussi d'entropie de 29 bits, ou de 75 bits.

L'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (Anssi) formule des conseils sur ces questions. Quand il s'agit des mots de passe ou de clés secrètes pour des systèmes de chiffrement dont on veut absolument assurer la sécurité, elle conseille de n'utiliser que des espaces de 100 bits au moins. Il est

même recommandé une taille d'au moins 128 bits si l'on souhaite que la sécurité soit assurée pour plusieurs années. L'Anssi précise qu'il faut considérer comme très faibles les espaces de moins de 64 bits, comme faibles ceux entre 64 et 80 bits, comme moyens ceux entre 80 et 100. La différence entre la sécurité instantanée et la sécurité à long terme provient de la loi de Moore, selon laquelle la puissance de calcul d'un ordinateur d'un prix donné double tous les deux ans environ. Même si cette loi de Moore semble voir son rythme

2

diminuer, il est sage de la prendre en compte pour des mots de passe qu'on veut sécuriser durablement.

Pour un mot de passe vraiment robuste au sens de l'Anssi, il faudrait par exemple demander une suite de 16 caractères pris chacun dans un ensemble de 200 caractères. Cela ferait un espace de 123 bits.

Ce n'est guère envisageable, aussi les concepteurs de systèmes sont-ils moins exigeants et se contentent-ils d'espaces de mots de passe faibles ou moyens; ils n'appliquent l'exigence de clés longues que lorsque l'utilisateur n'a pas à la mémoriser lui-même, car elle est gérée automatiquement par le système.

D'autres procédés sont mis en œuvre pour empêcher l'exploration de l'espace des possibilités et casser les mots de passe. Le plus simple est bien connu et utilisé par les cartes bancaires: au bout de trois essais infructueux, la carte est bloquée. D'autres idées ont été proposées comme doubler les temps d'attente entre deux essais à chaque nouvelle erreur, sauf s'il s'est passé un long moment, 24 heures par exemple, auquel cas le système se remet à zéro.

Ces méthodes sont cependant inopérantes quand l'attaquant du système peut travailler hors ligne et mener des essais secrètement de manière isolée, ou que le système ne peut pas être configuré pour arrêter et freiner les essais infructueux.

Assez souvent, un attaquant réussit à se procurer le mot de passe chiffré ou l'empreinte du mot de passe (nous allons voir ce qu'est une empreinte) en accédant à des données du système qu'il attaque. Il peut alors, en toute tranquillité, pendant des jours entiers ou même des semaines, mener toutes les tentatives qu'il souhaite pour casser les mots de passe dont il s'est emparé sous forme chiffrée.

Avant d'expliquer les subtils procédés utilisés par de tels attaquants, revenons sur la taille de l'espace des possibilités.

Quand nous avons évalué la taille en bits d'un espace de clés ou mots de passe, dénommée entropie, nous avons implicitement supposé que l'utilisateur choisit au hasard uniformément son mot de passe dans cet espace. Le plus souvent, ce n'est pas le cas, car pour mémoriser un mot de passe on préférera un mot courant, par exemple « locomotive », à un mot vraiment quelconque, par exemple « xdichqewax ».

DES DICTIONNAIRES POUR ATTAQUER

C'est là un grave problème qui donne lieu aux attaques par dictionnaires. Des listes de mots de passe couramment utilisés ont été collectées et classées en fonction de la fréquence avec laquelle ces mots de passe sont utilisés. Un attaquant tentera des essais en prenant l'une de ces listes et en l'utilisant dans l'ordre.

LES PIRATES DÉÇUS PAR LES FONCTIONS DE HACHAGE



Les fonctions de hachage cryptographique sont des procédés soigneusement mis au point qui transforment un fichier

informatique F , aussi long soit-il, en une suite $h(F)$ de petite taille appelée empreinte de F . Par exemple, la fonction notée SHA256 transforme la phrase « Il fait beau » en :

316FF650DC5FFC6F8B9CFF25069942F4AA5088
78930A1410D81D5F1DD8C71077

(64 caractères hexadécimaux qui sont équivalents à 256 bits).

Changer un seul caractère du fichier change totalement son empreinte. Par exemple, pour « il fait beau », la fonction SHA256 donne l'empreinte :

D66D08EC93EBA6ACCDD552E2A38EBE6474285
E0D4F2370A87E206553E29AB93C.

Vous pouvez refaire et vérifier ces calculs à l'adresse :
<https://passwordsgenerator.net/sha256-hash-generator/>
ou <https://www.xorbin.com/tools/sha256-hash-calculator>.

Les bonnes fonctions de hachage produisent des résultats analogues à ceux qui seraient obtenus s'ils étaient tirés uniformément au hasard. Surtout, pour un résultat possible arbitraire (une suite de 64 caractères hexadécimaux), il est impossible de trouver en un temps raisonnable un fichier F ayant cette empreinte.

Il existe plusieurs générations de fonctions de hachage. Les générations SHA0 et SHA1 sont considérées comme obsolètes et déconseillées. La génération SHA2, à laquelle appartient SHA256, est considérée comme sûre.

Au lieu de mémoriser les mots de passe de leur client, les serveurs internet doivent mémoriser les empreintes de ces mots de passe. En cas d'intrusion, il sera alors impossible ou très difficile au pirate informatique d'exploiter ce qu'il trouve.

Cela fonctionne remarquablement bien car, sans contraintes particulières, nous sommes tous tentés de choisir des mots simples, des noms, des prénoms, des petites phrases, et que les possibilités sont alors relativement peu nombreuses.

Cette utilisation non uniforme des possibilités équivaut à une réduction de l'espace des possibilités, ce qui diminue le nombre moyen d'essais pour casser un mot de passe.

Voici les 25 premiers éléments d'un de ces dictionnaires de mots de passe. Elle est tirée d'une base de 5 millions de mots de passe ayant fuité en 2017 et repérés par SplashData:

1. 123456; 2. Password; 3. 12345678; 4. qwerty; 5. 12345; 6. 123456789; 7. letmein; 8. 1234567; 9. football; 10. iloveyou; 11. admin; 12. welcome; 13. monkey; 14. login; 15. abc123; 16. starwars; 17. 123123; 18. dragon; 19. password; 20. master; 21. hello; 22. freedom; 23. whatever; 24. qazwsx; 25. trustno1.

Remarquez le «password» en seconde position et le sympathique «iloveyou» en position 10. Bien sûr, des telles listes changent selon le pays où elles sont collectées, les sites concernés et au cours du temps.

Pour les mots de passe de 4 chiffres (par exemple le code PIN des cartes SIM des téléphones), les résultats sont encore plus étonnants. En 2013, le site DataGenetics, s'appuyant sur une collecte de 3,4 millions de mots de passe, chacun comportant 4 chiffres, a mesuré que la suite de 4 chiffres la plus utilisée était 1234, qui représentait 11% des choix, suivie par 1111 et 0000 avec des scores de 6% et 2%.

Le mot de passe de 4 chiffres le moins utilisé était 8068. Méfiez-vous quand même, ce n'est peut-être plus vrai maintenant que ces résultats ont été publiés. Le choix 8068 n'était présent que 25 fois parmi les 3,4 millions de suites de 4 chiffres de la base, ce qui est beaucoup moins que les 340 utilisations qu'on aurait trouvées si chaque combinaison de 4 chiffres avait été utilisée avec la même fréquence.

Les 20 premières séries de 4 chiffres sont: 1234; 1111; 0000; 1212; 7777; 1004; 2000; 4444; 2222; 6969; 9999; 3333; 5555; 6666; 1122; 1313; 8888; 4321; 2001; 1010.

Même sans dictionnaire de mots de passe, l'utilisation des différences entre fréquences d'usage des lettres (ou des doubles lettres) dans une langue permet d'organiser efficacement une attaque. Certaines méthodes d'attaque prennent aussi en compte que, pour faciliter la mémorisation, on choisit des mots ayant une certaine structure comme A1=B2=C3, AwX2AwX2, 000.111. (que j'ai longtemps utilisé), ou alors obtenus en combinant plusieurs mots simples comme password123 ou johnABC0000. En exploitant de telles régularités, on détermine un ordre d'attaque des mots de passe qui accélère la recherche. La

conclusion est simple: dans un espace donné, il faut vraiment choisir au hasard son mot de passe. Certains logiciels le font pour vous et vous proposent donc un mot de passe au hasard. Il faut cependant être conscient qu'un logiciel qui engendre un mot de passe au hasard risque d'utiliser, délibérément ou non, un mauvais générateur pseudoaléatoire, auquel cas ce qu'il propose sera imparfait.

Informés de tout cela, les sites internet convenablement conçus analysent les mots de passe proposés au moment de leur création et refusent ceux qu'il serait trop facile de retrouver. C'est agaçant, mais c'est pour votre bien!

TESTER LES MOTS DE PASSE...

Un outil permet de vérifier si l'un de vos mots de passe n'a pas déjà été piraté. Il utilise une base de plus de 500 millions de mots de passe obtenue en regroupant des listes dévoilées à la suite d'attaques diverses:

<https://haveibeenpwned.com/Passwords>
J'ai essayé e=mc2e=mc2 que j'aimais bien et pensais sûr, et j'ai obtenu la réponse déconcertante: «This password has been seen 110 times before.» Quelques autres essais montrent qu'il est difficile de proposer un mot de passe facile à mémoriser et que la base ne connaît pas. Par exemple, aaaaaa est apparu 353071 fois; a1b2c3d4, 105134 fois; abcdcba, 353 fois; abczyx: 158 fois; acegi, 111 fois; chirac, 600 fois; sarkozy, 680 fois; hollande, 832 fois; macron, 279 fois.

Notons qu'être original reste possible. Voici cinq exemples de mots de passe que le site n'a pas dans sa liste: eyahled (mon nom à l'envers); bizzzzard; meaudepace; modeuxpass; abcdef2018. Maintenant que je les ai essayés, je me demande si la base ne pourrait pas les ajouter lors de sa prochaine mise à jour et je ne les utiliserai donc pas!

Le NIST (National Institute of Standards and Technology), aux États-Unis, a récemment publié un avis où il recommande la méthode des dictionnaires pour filtrer le mot de passe choisi par un utilisateur qui est en train d'en créer.

... ET SAVOIR LES CONSERVER

Parmi les règles qu'un bon concepteur de serveur internet doit absolument appliquer, il y a celle-ci: ne pas garder dans les mémoires de l'ordinateur qui fait fonctionner le site internet la liste en clair des couples [identifiant d'utilisateur, mot de passe].

La raison est évidente: un pirate pourrait accéder à l'ordinateur contenant cette liste, soit parce que le site est mal protégé, soit parce qu'une faille profonde dans le système, ou dans la puce au cœur de la machine, aura été exploitée, alors qu'elle est inconnue de tous (faille Zero-day)... sauf de l'attaquant.

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, **Mot de passe et Rainbow table**, entrées consultées en juin 2018.

G. Avoine et al., **How to handle rainbow tables with external memory**, dans J. Pieprzyk et S. Suriadi (éd.), *Information Security and Privacy - ACISP 2017*, pp. 306-323, Springer, Cham, 2017.

P. A. Grassi et al., **Digital Identity Guidelines**, NIST Special Publication 800-63-3, 2017 (<https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-63-3>).

G. Avoine et al., **Characterization and improvement of time-memory trade-off based on perfect tables**, *ACM Transactions on Information and System Security*, vol. 11(4), article 17, 2008.

P. Oechslin, **Making a faster cryptanalytic time-memory trade-off**, dans D. Boneh (éd.), *Advances in Cryptology - CRYPTO 2003*, pp. 617-630, Springer, 2003.

M. E. Hellman, **A cryptanalytic time-memory trade-off**, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-26, n° 4, pp. 401-406, 1980.

3

LES TABLES ARC-EN-CIEL

Vous êtes un pirate informatique et vous cherchez le moyen

d'exploiter une ou plusieurs données que vous vous êtes procurées. Ces données sont du type [identifiant d'utilisateur, $h(\text{mot de passe})$], où h est une fonction de hachage connue et fixée (voir l'encadré 2). Le mot de passe appartient à l'espace obtenu avec 12 lettres minuscules, ce qui correspond à 56 bits d'information et à $26^{12} = 9,54 \times 10^{16}$ mots de passe possibles.

Méthode 1. Vous faites défiler tous les mots de passe M possibles. Vous calculez l'empreinte $h(M)$ de chacun en regardant si c'est la bonne. Vous n'avez pas besoin d'un important volume de mémoire, car, à chaque nouvel essai, vous effacez les résultats précédents, sauf bien sûr le point de repère qui vous permet de savoir où vous en êtes de votre énumération.

En revanche, il vous faut beaucoup de temps pour faire défiler tous les mots de passe possibles. Si votre ordinateur peut mener un milliard d'essais par seconde, il vous faut $26^{12} / (10^9 \times 3\,600 \times 24) = 1\,104$ jours, soit environ 3 ans. Ce n'est pas impossible à envisager et, en utilisant un réseau d'ordinateurs d'un millier de machines, une journée suffira. Cependant, il n'est pas envisageable de reprendre un tel calcul à chaque fois que vous découvrirez une nouvelle donnée de la même catégorie.

Méthode 2. Vous vous dites : « Je vais calculer les empreintes de tous les mots de passe, ce qui me prendra du temps, mais je vais mémoriser ces empreintes dans une grande table. Je n'aurai ensuite qu'à regarder cette table pour

savoir quel mot de passe a été utilisé, et cela me servira pour tout nouveau mot de passe de la même catégorie dont je réussirai à connaître l'empreinte. »

(Il faudra $(9,54 \times 10^{16}) \times (12 + 32)$

octets de mémoire, car il faut 12 octets pour le mot de passe et 32 pour l'empreinte si elle comporte 256 bits comme pour la fonction SHA256. Cela fait $4,2 \times 10^{18}$ octets, soit 4,2 millions de disques durs d'une capacité de 1 téraoctet !

La mémoire requise est trop grande. Cette méthode n'est pas plus envisageable que la première. La méthode 1 exige trop de calcul, la méthode 2 trop de mémoire. Ça coince dans les deux cas : le calcul est trop long pour chaque nouveau problème, ou le précalcul avec mémorisation des résultats trop volumineux pour conserver les calculs faits.

Pourrait-on trouver une méthode intermédiaire qui exigerait moins de calculs que la méthode 1 pour chaque nouvelle donnée, mais peut-être un peu plus de mémoire, et qui exigerait moins de mémoire que la méthode 2, mais peut-être un peu plus de calculs ? Oui, c'est possible. L'idée a été proposée par l'Américain Martin Hellman en 1980, puis perfectionnée en 2003 par Philippe Oechslin, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et plus récemment encore par Gildas Avoine, de l'Insa de Rennes.

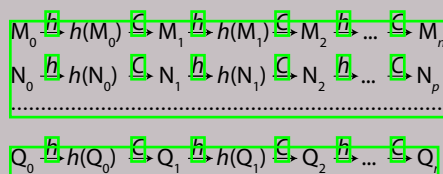
Voici comment procéder : on se dote d'abord d'une fonction C qui, à partir de l'empreinte $h(M)$ du mot de passe M produit un nouveau mot de passe $C(h(M))$. Les empreintes sont des nombres écrits

en binaire, et les mots de passe des nombres écrits dans une base de numération ayant autant de chiffres qu'il y a de symboles autorisés (disons K). Cette fonction C , dite de conversion, sera par exemple une conversion de la base 2 à la base K . Le précalcul crée des tables de données dénommées *tables arc-en-ciel*, sans doute parce qu'elles sont comme un ensemble de lignes parallèles. Pour une donnée de cette table, on part d'un mot de passe quelconque M_0 , on calcule son empreinte $h(M_0)$, puis un nouveau mot de passe possible $C(h(M_0)) = M_1$, et on recommence à partir de M_1 , et ainsi de suite. Sans rien mémoriser d'autre que M_0 , on calcule ainsi la suite $M_1, M_2, \dots$ jusqu'à ce que $h(M_n)$ commence par 20 zéros, ce qui ne se produit qu'une fois sur 1 000 000 environ (car ce que produit une fonction de hachage est assimilable à un tirage aléatoire uniforme et que 2^{20} vaut à peu près 1 000 000). On mémorise alors le couple $[M_0, h(M_n)]$ dans la table.

On calcule un très grand nombre de couples de ce type. Si, lors d'un calcul, on tombe sur le même $h(M_n)$ final, on n'ajoute rien, sauf si le calcul a été plus long (en nombre d'étapes), auquel cas on garde le nouveau couple et on efface l'ancien.

Chaque couple $[M_0, h(M_n)]$ représente la série de mots de passe $M_0, M_1, \dots, M_k$ et leurs empreintes, mais sans les mémoriser. Si l'on veut ne laisser aucun vide dans le tableau calculé, le temps de calcul sera plus important que celui nécessaire pour faire dérouler tous les mots de passe de l'espace qu'on explore. C'est envisageable avec un réseau d'ordinateurs, mais on peut ne mener le calcul de la table que partiellement : la base constituée ne résoudra alors qu'une partie des mots de passe dont on connaîtra l'empreinte. Dans le cas d'un calcul complet, l'espace mémoire pour stocker (indirectement) tous les couples calculés est, en ordre de grandeur, un million de fois plus petit que celui de la méthode 2 envisagée plus haut. Il est donc de moins de 4 disques durs de 1 téraoctet. Cette fois, c'est facile.

Voyons maintenant comment cette donnée enregistrée dans les disques permet de retrouver chaque mot de passe de l'espace envisagé en quelques secondes. Nous supposons pour



En connaissant le début de chaque ligne et la fin (ce sont les seules choses qu'on mémorise lors du précalcul), le pirate peut retrouver tout mot de passe dont il connaît l'empreinte : on part de l'empreinte connue qui est quelque part dans le tableau, et on applique C et h plusieurs fois, ce qui amène en bout de ligne. Cela permet de repérer la ligne où se trouve le mot de passe. Connaissant la ligne où se trouve le mot de passe, on repart du début de la ligne (qui est connu) et, en quelques applications de h et C , on retombe sur l'empreinte qu'on connaît, ce qui indique le mot de passe recherché. Beaucoup de calculs auront été nécessaires pour établir la première et la dernière colonne de la table. Mais ensuite, en ne mémorisant que deux colonnes, et moyennant un calcul (en gros le parcours d'une ligne), on retrouve tout mot de passe à partir de son empreinte.

le raisonnement que dans la phase de précalcul du tableau, on a pris en compte tous les mots de passe de la catégorie visée, par exemple les mots de passe de 12 caractères pris dans les 26 lettres de l'alphabet.

Pour examiner une empreinte e_o , on procède de la façon suivante. On calcule $h(C(e_o)) = e_1$, puis $h(C(e_1)) = e_2$, etc., jusqu'à obtenir une empreinte e_m qui commence par 20 zéros. On regarde alors dans la table à quel M_0 elle est associée. Il y en a nécessairement un, car le mot de passe qu'on étudie est dans l'une des séries qu'on a fait défiler. On part alors de ce M_0 et on calcule $h(M_0)$, $h(C(h(M_0))) = h_1$, etc., jusqu'à tomber sur e_o , ce qui se produit nécessairement. Imaginons que cela se produise pour h_k (c'est-à-dire $h_k = e_o$). Le mot de passe que l'on recherche est alors $C(h_{k-1})$.

Le temps de calcul nécessaire est celui qu'il faut pour rechercher e_m dans la table, auquel il faut ajouter le temps de calcul des $h_1, h_2, \dots, h_k$, qui est environ un million de fois plus court que le temps de calcul ayant été nécessaire pour calculer la table, c'est-à-dire très raisonnable.

Ainsi, avoir fait un précalcul (très long) et en avoir enregistré partiellement les résultats permet de retrouver en un temps raisonnable tout mot de passe dont on connaît l'empreinte.

En résumé, l'idée consiste :

- (1) à classer les mots de passe en paquets, dans chacun desquels se retrouvent les mots de passe qui aboutissent à la même empreinte commençant par 20 zéros ;
- (2) face à un mot de passe dont on connaît l'empreinte, à retrouver d'abord le paquet auquel il appartient grâce à ce qu'on a mémorisé ;
- (3) à déterminer dans ce paquet l'endroit où le mot de passe se trouve en opérant un calcul assez court.

Une première idée consiste à chiffrer les mots de passe de la liste, c'est-à-dire à utiliser un code secret qui les transforme grâce à une clé de chiffrement en suites de signes apparemment aléatoires pour quiconque ignore la clé de déchiffrement. Cette méthode fonctionne, mais présente deux inconvénients. Il faut déchiffrer le mot de passe associé à un utilisateur à chaque fois qu'on veut le comparer à celui qu'il indique, ce qui n'est pas très commode. Plus grave, pour mener ce déchiffrement nécessaire à la comparaison, il faut garder, dans la mémoire de l'ordinateur du site, la clé de déchiffrement. Or cette clé pourrait être repérée par le pirate, ce qui ramène au problème précédent !

DU HACHAGE... PRÉCÉDÉ PAR UN SALAGE !

La bonne méthode est celle des fonctions de hachage qui produisent des empreintes. Une fonction de hachage est une fonction qui, à tout fichier F donné, associe une « empreinte » (on parle aussi de « condensé », ou de « hash ») $h(F)$, qui est un mot assez court, propre au fichier F , mais produit de telle façon qu'en pratique, il est impossible de retrouver F à partir de $h(F)$. On parle de fonction à sens unique : passer de F à $h(F)$ est facile, passer de $h(F)$ à F est impossible en pratique. De plus, les fonctions de hachage utilisées ont la propriété que même s'il se peut que deux fichiers F et F' aient la même empreinte $h(F) = h(F')$ (on parle de collision), en pratique personne ne sait, pour un F donné, trouver un F' ayant la même empreinte que F .

Avec une telle fonction de hachage, le stockage des mots de passe sur un serveur informatique est facile : au lieu de la liste des couples [identifiant, mot de passe], on ne gardera sur le serveur que la liste des couples [identifiant, $h(\text{mot de passe})$].

Quand un utilisateur voudra se connecter, le serveur lira son mot de passe mdp , en calculera l'empreinte $h(mdp)$ et regardera si c'est bien ce que sa liste de couples mémorisés indique en face de l'identifiant d'utilisateur. Le hacker sera bien ennuyé, car même s'il a pu accéder à cette liste, il ne pourra pas connaître les mots de passe des utilisateurs (impossibilité en pratique de passer de $h(mdp)$ à mdp), et sera aussi dans l'impossibilité de produire un autre mot de passe mdp' qui aurait la même empreinte et bernerait le serveur (impossibilité pratique des collisions).

Cette prudence recommandée est réellement importante, car même de grands sites prenant la peine de bien se protéger contre les intrusions sont régulièrement piratés. En 2016, le groupe Yahoo! s'était ainsi fait voler les données de un milliard de comptes !

Pour compliquer encore l'exploitation d'une liste volée du type [identifiant, $h(\text{mot$

de passe)], on utilise parfois la méthode du « salage » qui consiste à ajouter au mot de passe une chaîne de caractères aléatoires, différente pour chaque mot de passe. De cette façon, même si deux utilisateurs utilisent le même mot de passe, les empreintes mémorisées seront différentes. Bien sûr, il faudra alors que la liste détenue par le serveur contienne pour chaque utilisateur trois éléments : [identifiant, $h(\text{mot de passe} + \text{salage})$, salage]. Quand le serveur veut vérifier le mot de passe qu'un utilisateur vient de donner, il lui ajoute le salage, calcule l'empreinte, et compare avec ce qu'il a dans sa base.

Même quand les mots de passe des utilisateurs sont faibles, cette méthode complique considérablement le travail du hacker. Sans salage, il peut calculer toutes les empreintes d'un dictionnaire et regarder celles qui sont présentes dans les données volées ; tous les mots de passe présents dans son dictionnaire seront repérés. Avec salage, le travail d'exploitation de son dictionnaire devient plus compliqué : le hacker est obligé, pour chaque utilisateur, de calculer les empreintes de tous les mots de passe de son dictionnaire auquel il ajoute le salage propre de l'utilisateur (qu'il connaît puisqu'il a volé la liste). S'il y a 1000 utilisateurs, cela multiplie par 1000 le calcul à faire pour exploiter son dictionnaire.

UN COMPROMIS ENTRE TROP DE CALCUL ET TROP DE MÉMOIRE

Pour bien se défendre contre un attaquant, mieux vaut connaître les méthodes qu'il pourrait mettre en œuvre pour repérer des mots de passe et plus généralement exploiter une table de couples [identifiant d'utilisateur, $h(\text{mot de passe})$]. On se trouve pris entre deux difficultés : soit il faut beaucoup calculer, c'est-à-dire détenir une grande puissance de calcul, soit il faut disposer de beaucoup de mémoire pour mener un long précalcul, éventuellement pendant des semaines ou des mois, en enregistrant tout ce qu'on calcule et qu'on pourra ensuite exploiter facilement.

Bien souvent, aucune des deux méthodes ne fonctionne. Reste alors l'espoir de concevoir une méthode intermédiaire, qui exige moins de mémoire pour enregistrer le résultat d'un calcul fait à l'avance, et qui, au moment de son exploitation, exige une quantité de calcul raisonnable. L'encadré 3 présente la méthode des tables arc-en-ciel, qui réussit ce compromis.

La science des mots de passe, à l'ère d'Internet, des puissants calculateurs et des réseaux d'ordinateurs, est le théâtre d'une lutte sans merci entre ceux (chacun de nous) qui veulent les utiliser pour se protéger, et ceux qui cherchent à les connaître pour en tirer profit... à nos dépens. ■

L'AUTEUR



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

VOUS PRENDREZ BIEN UN VER À L'ŒIL?

Une peinture rend hommage... au parasite qui a infecté pendant plusieurs mois l'artiste qui l'a réalisée!

N

ombre d'œuvres révèlent les maladies dont souffraient leurs auteurs. La cataracte de Claude Monet se traduisait par de plus en plus de couleurs chaudes dans ses peintures. La maladie oculaire d'Edgar Degas l'obligeait à peindre en intérieur. Le strabisme divergent de Rembrandt l'aurait aidé à rendre au mieux le relief sur ses toiles. Mais il est plus rare de voir sur le tableau la cause de la maladie elle-même!

C'est pourtant le cas avec *The Host* (voir page ci-contre), de Ben Taylor, alias Mometo, artiste d'origine australienne et installé en Grande-Bretagne. L'histoire est singulière.

En 2014, il travaille à un tableau, un disque blanc parcouru de motifs sinueux

et psychédéliques, complètement abstrait, peint sans idée préconçue et qui ne le satisfait guère. Il le relègue dans un coin de son atelier et l'oublie. C'est qu'il a d'autres soucis...

Depuis quelque temps, l'artiste présente en effet de nombreux symptômes qui laissent les médecins perplexes et impuissants: des protubérances épisodiques sur la peau, des éruptions cutanées, une douleur insupportable qui lui saisit régulièrement les yeux, d'autres au niveau des articulations, un appétit insatiable sans prise de poids... Les examens ne révèlent rien, si ce n'est des concentrations sanguines en globules blancs qui grimpent en flèche par moments.

Jusqu'au jour où, dans un miroir, il remarque une petite bosse dans sa cornée (la partie antérieure, transparente, du globe oculaire) gauche, et sent son œil vibrer. Soudain, la bosse s'estompe et laisse la place à une ligne blanchâtre, sensible au toucher.

Il se précipite à l'hôpital où un médecin, à l'aide d'un scalpel, extirpe de

Loa loa, un ver pris dans la toile.

l'œil... un ver d'environ trois centimètres de longueur. De quoi s'agit-il? D'une filaire loa loa (un nématode) qui, effectivement, est connue pour parfois errer dans les tissus des yeux, visible de l'extérieur, au point d'être parfois surnommé le «ver africain de l'œil».

Le parasite est endémique des forêts tropicales d'Afrique centrale et occidentale. Elle est transmise à l'homme via la piqûre de deux espèces de mouches, *Chrysops silacea* et *Chrysops dimidiata*. Elles injectent alors des larves qui se développent rapidement en adultes, ceux-ci résidant sous la peau, et donc parfois





dans les yeux. Ils peuvent atteindre près de 8 centimètres! Dans l'organisme humain, ils produisent des «microfilaires» que l'on peut retrouver dans le liquide céphalorachidien, l'urine, la salive... La journée, ils circulent dans le sang périphérique, jusqu'à ce qu'ils rejoignent l'organisme d'une mouche à l'occasion d'une nouvelle piqure.

L'origine de ses étranges symptômes diagnostiquée, Ben Taylor fut traité à Londres, dans un établissement spécialisé en maladies tropicales. On lui découvrit alors deux autres infections, une ankylostomose et une anguillulose,

deux maladies dues également à des vers nématodes, installés dans l'intestin.

Le loa loa a probablement été contracté à l'occasion d'un voyage en 2013 dans les jungles du Gabon, sur les terres des Pygmées babongo. Les deux autres parasitoses sont sans doute plus anciennes, l'artiste ayant longuement séjourné en Afrique, notamment au Nigeria.

De retour dans son atelier, Ben Taylor redécouvre le tableau délaissé et l'inspiration le saisit. Il en fait le témoignage de son calvaire en transformant le disque en l'iris d'un œil, le sien, qu'il complète en ajoutant des cils, leur reflet dans l'iris, et

bien sûr un ver loa loa qui traverse toute la toile. En août 2018, *The Host (L'Hôte)*, nouveau titre donné à la peinture, a fait la couverture de la revue médicale spécialisée *Emerging Infectious Diseases*. ■

B. Breedlove et R. Bradbury, *A worm's eye view*, *Emerging Infectious Diseases*, vol. 24(8), 2018. Le site de Ben Taylor : www.mometo.net/paintings

Loïc Mangin a récemment publié : **Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer... et la science**, une sélection de ses chroniques (Belin, 2018).



LES AUTEURS



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

LES REBONDS DU CANON DE GALILÉE

En empilant judicieusement des balles les unes sur les autres, puis en les lâchant, on obtient des rebonds spectaculaires.

Lune balle lâchée au-dessus du sol rebondit toujours moins haut que sa position initiale. Mais si on renouvelle l'expérience en lâchant une balle de tennis superposée à un ballon de basket, la balle remontera bien plus haut. Cet étonnant effet, dit du canon de Galilée, est considérablement amplifié lorsque le nombre de balles empilées augmente (voir l'illustration ci-contre).

Quels sont les mécanismes responsables de l'effet? Existe-t-il des limites à ses performances? Si oui, lesquelles? Connaissant la réponse, le lecteur pourra s'atteler à battre le record homologué dans le *Livre Guinness des records*: la somme toute modeste hauteur de 9 mètres obtenue en 2016 par le physicien américain Brian Green sur un plateau de télévision, avec un ensemble de cinq balles élastiques lâchées à hauteur d'homme.

Examinons le dispositif équivalent, mais plus simple, constitué d'une balle de tennis superposée à un ballon de basket.

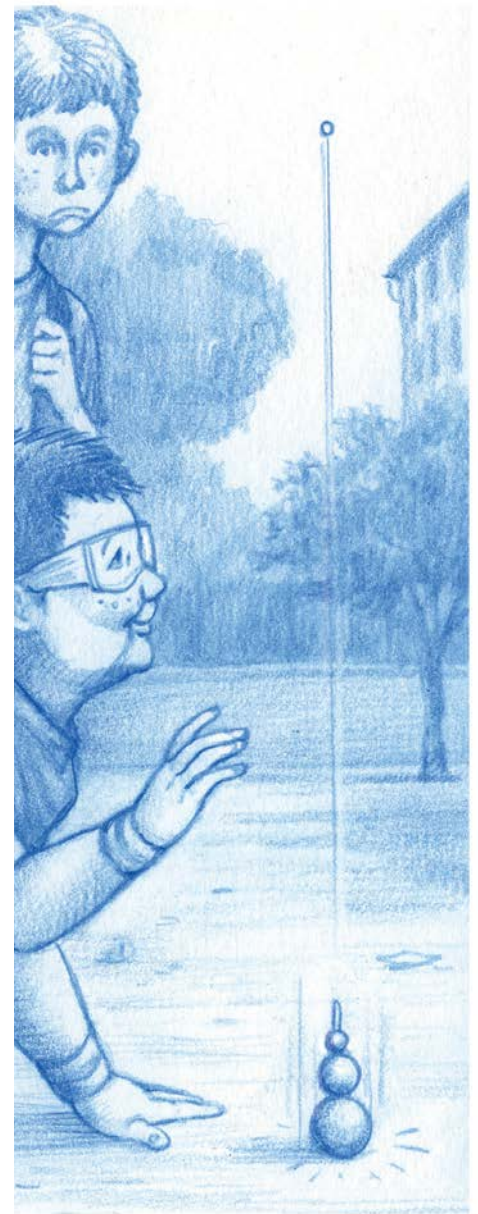
Tenons à bout de bras l'ensemble bien vertical et lâchons-le au-dessus d'un sol dur. Au moment de l'impact, la petite balle repart à vive allure et remonte à plus du double de la hauteur initiale. Que s'est-il passé?

DES COLLISIONS ACCÉLÉRATRICES

Pour le comprendre, décomposons le mouvement et supposons la balle légèrement séparée du ballon. Lors de la chute libre, la balle et le ballon accélèrent sous l'effet de la gravité et atteignent la même vitesse v_0 , qui croît comme la racine carrée de la hauteur h_0 de la chute.

Le ballon, qui touche le sol, rebondit vers le haut. Pour simplifier, supposons la collision élastique, c'est-à-dire sans perte d'énergie cinétique. Le ballon repart donc vers le haut à la même vitesse et vient percuter la balle, qui est toujours en train de descendre à ce moment-là.

C'est dans cette collision à contresens que se révèle l'aspect astucieux du



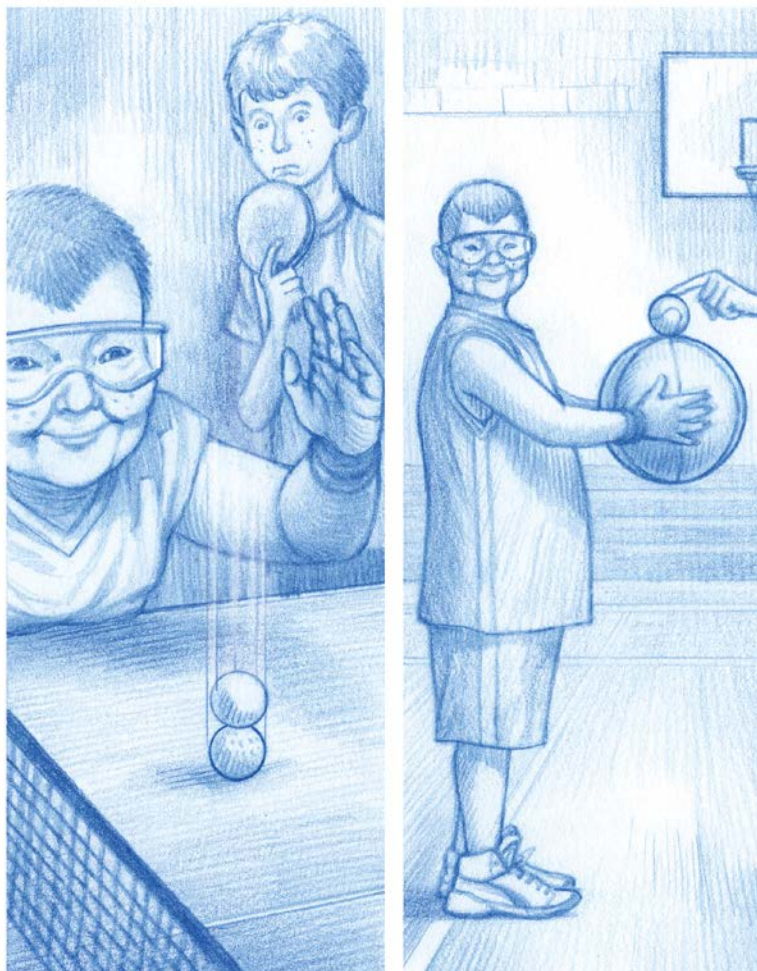
dispositif. Si les deux balles étaient identiques, elles repartiraient en sens inverses, avec les mêmes vitesses qu'avant le choc (celui-ci étant supposé élastique). Mais comme la masse du ballon de basket est bien supérieure à celle de la balle de tennis, on n'est pas très loin de la situation limite d'une balle lancée contre un mur ou une raquette fermement tenue.

Le choc altère donc à peine le mouvement du ballon (qui joue le rôle de la raquette), tandis que la balle de tennis est vivement accélérée. De combien?

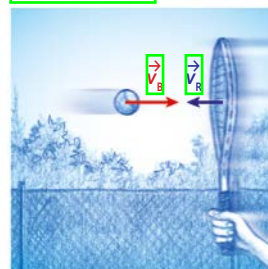
Lors du rebond élastique d'une balle sur une raquette, la vitesse de la balle par

LE CHOC BALLE-RAQUETTE

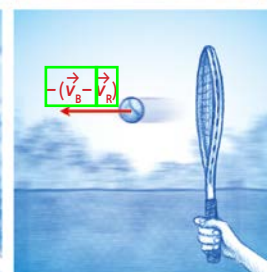
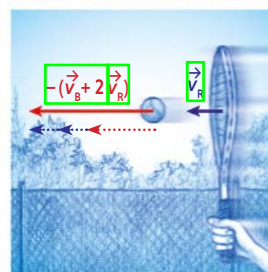
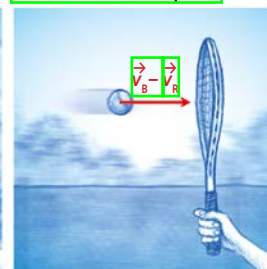
Quand une balle vient frapper une raquette qui s'approche elle-même de la balle, celle-ci repart avec une vitesse supérieure à sa vitesse initiale. La raquette (et la personne qui la tient) étant de masse très supérieure à celle de la balle, c'est comme si la balle heurtait un mur en mouvement vers elle. Notons $\vec{v}_B$ la vitesse initiale de la balle et $\vec{v}_R$ la vitesse de la raquette (il s'agit ici des vecteurs vitesse). La situation s'analyse plus facilement dans le référentiel où la raquette est immobile. Dans ce référentiel, la vitesse initiale de la balle est $\vec{v}_B - \vec{v}_R$. Le choc, supposé parfaitement élastique, inverse simplement cette vitesse, qui devient donc $-(\vec{v}_B - \vec{v}_R)$. Dans le référentiel du sol, cette dernière est égale à $-(\vec{v}_B - \vec{v}_R) + \vec{v}_R = -\vec{v}_B + 2\vec{v}_R$. Autrement dit, le supplément de vitesse de la balle dû au choc est égal à deux fois la vitesse de la raquette.



Référentiel du sol



Référentiel de la raquette



On obtient des rebonds importants avec deux balles de masses bien différentes. L'effet est encore plus spectaculaire avec les quatre balles de l'Astro Blaster.

rapport à la raquette est inversée (comme dans un rebond sur le sol). La raquette étant en mouvement, un raisonnement simple montre que la collision inverse la vitesse de la balle et lui ajoute deux fois celle de la raquette (voir l'encadré ci-dessus).

Il s'ensuit que, dans notre cas, la balle de tennis repart avec une vitesse trois fois supérieure à sa vitesse v_0 juste avant le rebond, c'est-à-dire de quoi monter à une hauteur neuf (3^2) fois supérieure à la hauteur du lâcher.

Les sportifs ont une connaissance intuitive de ce résultat: avec une même vitesse de bras, on propulse bien plus vite

un ballon en le frappant qu'en le lançant. Le service smashé au volley en témoigne!

On pense alors à tous les sports de balle. Lorsqu'on frappe une balle immobile, celle-ci est projetée à près de deux fois la vitesse du pied (football), de la main (volley ou hand), de la raquette (tennis, ping-pong), etc. On comprend mieux les efforts des sportifs pour travailler leurs coup franc, service ou autre swing. Et aussi pourquoi, lors des échanges qui se prolongent, la balle gagne de plus en plus de vitesse à chaque coup.

Moyennant quelques adaptations, le résultat s'applique dans d'autres

domaines. Par exemple au principe de la fronde (ou assistance) gravitationnelle, qui permet d'accélérer considérablement une sonde spatiale sans utiliser de carburant. Ici, point de forces de contact, mais l'action de la gravité lors de l'approche d'une planète par la sonde. Compte tenu de la nature des mouvements dans le plan de l'écliptique, le gain ne peut être de deux fois la vitesse de la planète, mais il

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



peut être notable. Ainsi, en 1999, la sonde *Cassini* a profité de son second passage au voisinage de Vénus, dont la vitesse orbitale était de 35 kilomètres par seconde, pour accélérer de 18 à 44 kilomètres par seconde.

Ayant compris le principe du canon de Galilée à deux balles, nous pouvons analyser l'Astro Blaster, un jouet constitué de quatre balles de tailles (et de masses) décroissantes de bas en haut. Ces balles sont enfilées sur une tige de telle façon que seule la dernière, la plus petite, puisse s'échapper à son extrémité.

Faisons un petit calcul en supposant que les chocs sont élastiques et que les balles sont de masses très différentes (voir l'encadré ci-contre). Avant le rebond, toutes les balles vont vers le bas à la vitesse v_0 . La balle du bas rebondit à la vitesse v_0 , la seconde à la vitesse $3v_0$, la troisième à la vitesse $7v_0$ (car $2 \times 3 + 1 = 7$), la quatrième à la vitesse $15v_0$ (car $2 \times 7 + 1 = 15$) et, s'il y en a plus, la n -ième à la vitesse $(2n-1)v_0$. La petite balle de l'Astro Blaster pourrait ainsi remonter à $15^2 = 225$ fois sa hauteur de chute!

Ces valeurs prédites sont en fait beaucoup trop élevées, surtout quand le nombre de balles augmente. En cause: nos hypothèses (balles de masses très inégales et chocs parfaitement élastiques) sont trop optimistes.

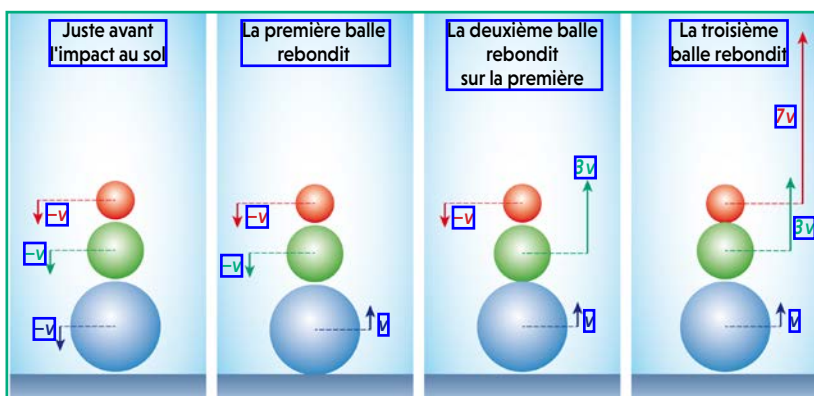
DES HYPOTHÈSES RÉALISTES SUR LES MASSES ET L'ÉLASTICITÉ

Tout d'abord, si la masse de la raquette n'est pas «très supérieure» à celle de la balle, la raquette subit un recul lors de la collision et le gain de vitesse est inférieur à 2 fois la vitesse de la raquette (mais le gain reste positif tant que la balle est plus légère que la raquette). Dès que l'on considère des masses réalistes, cette limitation, due à une loi fondamentale de la physique (la conservation de la quantité de mouvement), intervient.

Qu'en est-il de la seconde hypothèse, celle du choc élastique? Nous savons bien qu'un rebond n'est jamais parfait: une partie de l'énergie cinétique initiale est dissipée, soit sous forme de vibrations de la raquette ou de la balle, soit sous forme de chaleur. Cette perte est quantifiée par le «coefficient de restitution», égal au quotient de la vitesse d'éloignement des deux objets après le choc sur la vitesse d'approche avant le choc. Il vaut 1 si le choc est élastique. Pour la plupart des balles dont on parle ici, les coefficients de restitution sont compris entre 0,6 et 0,9. Bien que ces valeurs soient relativement élevées, les

REBONDS À LA CHAÎNE

On décompose ici en quatre étapes successives l'impact au sol et le rebond d'un trio de balles de masses décroissantes de bas en haut (et très légèrement espacées pour que l'on comprenne mieux le phénomène). Juste avant l'impact, chacune des balles a une vitesse $-v$ (en valeur algébrique, mesurée le long de la verticale). Quand la balle bleue rebondit, sa vitesse s'inverse. Quand cette balle vient frapper la balle verte, la vitesse de celle-ci s'inverse (v) et gagne $2v$, donc devient égale à $3v$. Et quand la balle verte vient heurter la balle rouge, la vitesse de celle-ci s'inverse (v) et gagne $2 \times (3v)$, donc devient égale à $7v$.



performances des canons de Galilée se dégradent rapidement. Avec un coefficient de 0,7, une balle ne rebondit en effet qu'à la moitié de la hauteur initiale.

La prise en compte des différences de masses et des coefficients de restitution permet d'affiner les prédictions. Une première conclusion est que la vitesse d'éjection de la petite balle reste proportionnelle à $\sqrt{h_0}$ et par conséquent que la hauteur de remontée est proportionnelle à h_0 . Pour établir un record, il faut donc prendre soin de préciser de quelle hauteur h_0 on a laissé chuter le dispositif.

Les calculs numériques se révèlent alors davantage compatibles avec nos observations. Dans le cas d'un ballon de basket (600 grammes) et d'une balle de tennis (57 grammes), avec des coefficients de restitution de 0,8 avec le sol et de 0,6 entre les balles, on prédit que la balle de tennis remonte à 2,7 fois sa hauteur de chute.

On peut reproduire aisément cette expérience chez soi, mais il faut que les balles restent bien alignées verticalement pour obtenir l'effet maximal. Sur le Web, chacun y va de sa recette pour garantir cet alignement. Dans le cas de l'Astro Blaster, le problème est résolu par la tige, mais attention aux frottements! En pratique, il est donc difficile de s'approcher des prédictions (une remontée à près de 12 fois la hauteur de chute, à comparer au facteur 225 du cas idéal), mais le record de Brian Green reste à portée de main. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Kireš, *Astroblaster – a fascinating game of multi-ball collisions*, *Physics Education*, vol. 44(2), pp. 159-164, 2009.

W. R. Mellen, *Aligner for elastic collisions of dropped balls*, *The Physics Teacher*, vol. 33(1), pp. 56-57, 1995.

Vidéo du record de Brian Greene : www.youtube.com/watch?v=75szwX09pg8

ABONNEZ-VOUS À

POUR LA
SCIENCE

OFFRE RENTRÉE

DURÉE
LIBRE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité www.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 TARIF D'ABONNEMENT	4,90€ PAR MOIS	5,75€ PAR MOIS	7,40€ PAR MOIS

29 %
de réduction*

40 %
de réduction*

49 %
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**

PAG18REN

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

☐ FORMULE INTÉGRALE • 12 n° du magazine papier • 4 Hors-série papier • Accès illimité aux contenus en ligne 7,40€ PAR MOIS -49 % PV7E40	☐ FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE • 12 n° du magazine papier • 4 Hors-série papier 5,75€ PAR MOIS -40 % PPV5E75	☐ FORMULE PAPIER • 12 n° du magazine papier 4,90€ PAR MOIS -29 % DPV4E90
---	--	--

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

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2019 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 abonnements. Ne rien inscrire

L'AUTEUR



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

LA PIEUVRE, UN ÉDITEUR HORS PAIR

Non contente d'être dotée d'un génome proche en taille à celui d'un humain, la pieuvre, contrairement aux vertébrés, en réécrit de nombreuses séquences et ce de manière héréditaire. Cette étonnante stratégie éditoriale aurait favorisé la complexification de son cerveau.

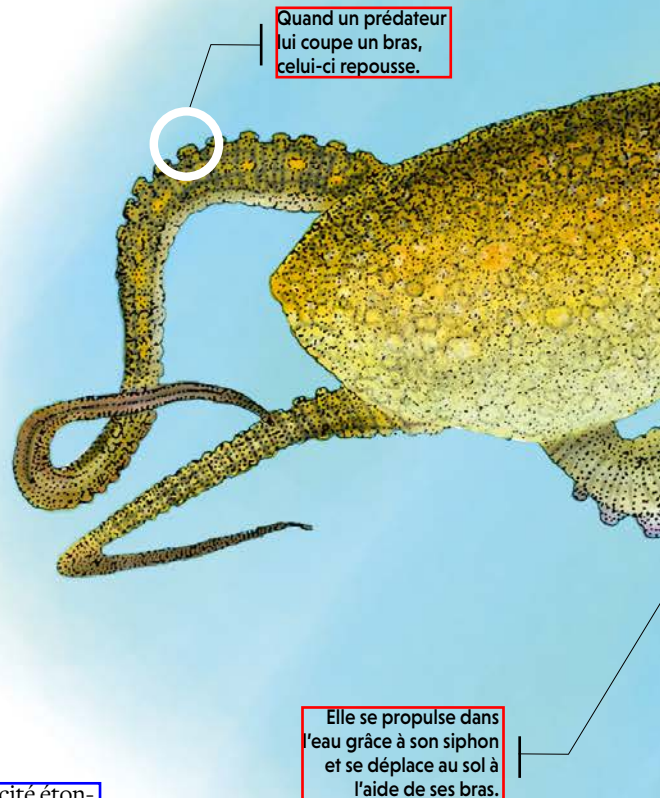
Les pieuvres sont connues pour avoir un comportement élaboré. Elles se laissent apprivoiser et savent résoudre des problèmes compliqués, comme dévisser le couvercle d'un récipient contenant un crabe... ou, à l'instar de Paul le poulpe, prédire les résultats des matchs de l'équipe d'Allemagne de football ! Le célèbre céphalopode ouvrait sans difficulté une boîte transparente contenant une friandise. Lors de la coupe du monde de football de 2010, il s'acquitta ainsi consciencieusement de la tâche avant chaque match, optant avec bonheur tantôt pour la boîte portant le drapeau allemand, tantôt pour celle de son adversaire.

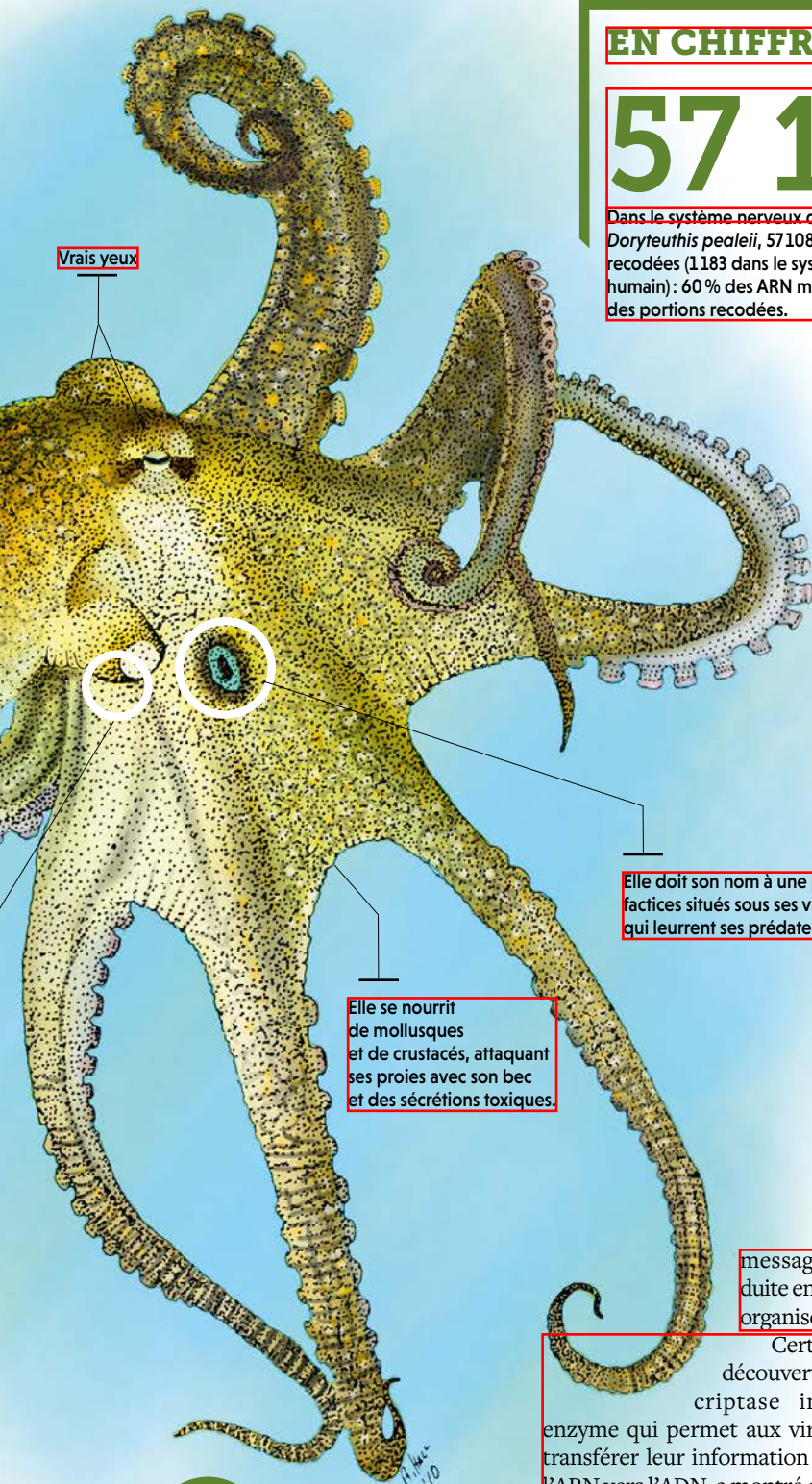
De fait, les pieuvres sont, avec les autres céphalopodes coléoides – les calmars et les seiches – les mollusques dotés du plus gros cerveau : une pieuvre compte environ 520 millions de neurones, soit plus qu'une souris (100 à 200 millions de neurones). Or, ces dernières années, plusieurs

études ont révélé une autre capacité étonnante de ces animaux : leur génome n'est pas traduit exactement comme on s'y attendrait, ce qui entraîne une dynamique évolutive originale de celui-ci... laquelle expliquerait la taille de leur cerveau.

DES SUBSTITUTIONS DANS L'ARN

On pensait que chez les coléoides, comme chez la plupart des organismes, la traduction des gènes en protéines suivait principalement le « dogme fondamental de la biologie moléculaire », énoncé en 1958 par Francis Crick. Avec James Watson, Maurice Wilkins et Rosalind Franklin, le biologiste britannique avait découvert quelques années auparavant la structure en double hélice de l'ADN, et ce dogme résumait les connaissances acquises depuis sur cette longue molécule observée dans les cellules : l'information génétique est conservée sur l'ADN, qui en est le support stable, est transcrite en molécules d'ARN





EN CHIFFRES

57 108

Dans le système nerveux du calmar totém *Doryteuthis pealeii*, 57 108 séquences sont recodées (1 183 dans le système nerveux humain) : 60 % des ARN messagers présentent des portions recodées.

530 millions

Les céphalopodes sont apparus il y a 530 millions d'années, lors de l'explosion de la vie pluricellulaire du Cambrien. Les coléoides et les nautilus ont divergé il y a entre 350 et 480 millions d'années, puis les octopodes (pieuvres) et les décapodes (seiches, calmars) il y a entre 250 et 350 millions d'années.

520 millions

La pieuvre a environ 520 millions de neurones, dont 40 millions dans le système nerveux central, 130 millions dans les lobes oculaires et 350 millions dans le système nerveux périphérique.

L'ADN et l'ARN sont constitués d'une succession de petites unités, les nucléotides, chacune caractérisée par une des quatre bases qui forment leur alphabet (A, T, G, C pour l'ADN et A, U, G, C pour l'ARN). Habituellement, la transcription de l'ADN en ARN messager suit une règle bien précise : par exemple, la base G de l'ADN est transcrite en C dans l'ARN messager, et la base T en A. Mais il arrive qu'après cette transcription, des modifications surviennent : la base C peut être transformée en U et *vice versa*, et la base A en une autre molécule, l'inosine. Or, dans la suite du processus de traduction d'un gène en protéine, l'inosine est reconnue comme une base G, ce qui modifie parfois la protéine produite. En d'autres termes, les modifications post-transcriptionnelles « éditent » (modifient) l'ARN messager et, dans une moindre mesure, les protéines elles-mêmes...

LE CAS DE LA PIEUVRE À DEUX POINTS

Quelle est la proportion de ces modifications ? Pour le savoir, plusieurs équipes ont comparé, chez divers organismes, les séquences génomiques (l'ADN) et transcriptomiques (l'ARN). C'est ainsi qu'en 2015, les équipes de Daniel Rokhsar, de l'université de Californie à Berkeley, et de Clifton Ragsdale, de l'université de Chicago, ont montré que, chez la pieuvre à deux points de Californie (*Octopus bimaculoides*), des dizaines de milliers de séquences codant des protéines sont éditées – bien plus que chez les autres organismes étudiés à la même époque, comme l'humain ou la mouche drosophile (quelques milliers).

messenger, puis traduite en protéines qui organisent la cellule.

Certes, en 1970, la découverte de la transcriptase inverse, une enzyme qui permet aux virus à ARN de transférer leur information génétique de l'ARN vers l'ADN, a montré que les choses n'étaient pas toujours aussi simples. Pourtant, à quelques exceptions près, le dogme paraissait s'appliquer de manière générale. Mais une quinzaine d'années plus tard, d'autres étrangetés sont apparues : on a mis en évidence des modifications dites post-transcriptionnelles, car elles touchent les ARN messagers, les intermédiaires de la traduction des gènes en protéines.



Pieuvre à deux points de Californie (*Octopus bimaculoides*)
Taille maximale : 20 cm (manteau)
Durée de vie : 2 ans

En 2017, au vu de ce résultat inattendu, des biologistes de l'université de Tel Aviv et du laboratoire de biologie marine de Woods Hole ont repris cette étude sous la direction de Joshua Rosenthal en étendant la prospection à d'autres céphalopodes: la pieuvre commune (*Octopus vulgaris*), la seiche commune (*Sepia officinalis*), le calmar totam (*Doryteuthis pealeii*) et le nautille flammé (*Nautilus pompilius*), auxquels ils ont ajouté un mollusque gastéropode, l'aplysie *Aplysia californica*, comme groupe extérieur. Ils ont alors découvert que l'édition exceptionnelle chez la pieuvre à deux points était généralisable aux autres céphalopodes – sauf au nautille. Ainsi, ils ont trouvé environ 100 000 séquences éditées chez les coléoides (les deux pieuvres, la seiche et le calmar), contre seulement un millier chez le nautille et l'aplysie.

LE SYSTÈME NERVEUX PARTICULIÈREMENT ÉDITÉ

Chez la pieuvre à deux points, les chercheurs ont séquencé le transcriptome de deux tissus différents, dont le système nerveux. Or c'est dans ce dernier qu'ils ont trouvé le plus grand nombre de portions éditées – cent fois plus que dans les autres tissus. De plus, 12% des éditions repérées dans le système nerveux entraînaient une modification du codage d'un acide aminé, contre moins de 1% chez les mammifères.

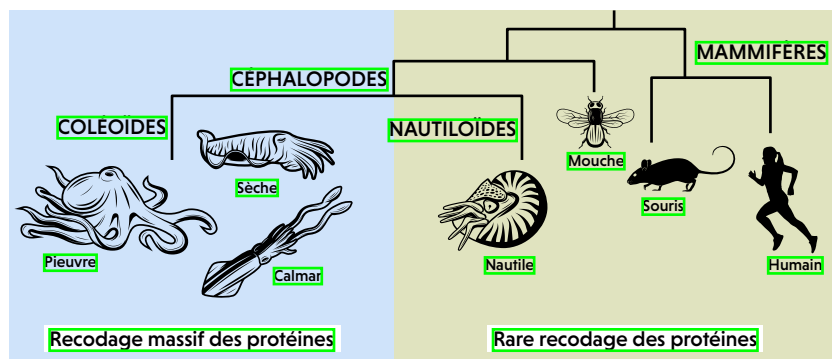
Une famille de gènes est particulièrement concernée. Ces gènes, au nombre de 168 chez la pieuvre à deux points (contre une vingtaine chez d'autres mollusques comme l'huître *Crassostrea gigas*), codent des protocadhérines, des protéines qui interviennent dans l'adhésion des cellules entre elles et jouent un rôle clé dans le développement et la survie des neurones, ainsi que dans la spécificité des synapses, les zones de contact entre neurones. Or les chercheurs ont observé que chez les coléoides, ces gènes subissent une édition majeure. De plus, dans la plupart des cas, tant l'ARN messager intact que l'ARN messager édité sont traduits en protéines, ce qui augmente encore le nombre de protocadhérines différentes produites.

Ainsi, chez les coléoides, l'augmentation inhabituelle de conversions de la base A en inosine paraît corrélée à l'acquisition évolutive d'un cerveau complexe, à la source de comportements élaborés. Mais multiplier les régions éditées a un prix, celui de figer une grande partie du génome.

En effet, la conversion de la base A en inosine est réalisée par une famille d'enzymes, le système ADAR, apparue très tôt dans le règne animal. Or ces enzymes

ÉDITER, UNE TACTIQUE DE SURVIE PARMI D'AUTRES

Les céphalopodes coléoides (pieuvres, seiches, calmars), au cerveau très développé, présentent un recodage massif des protéines via la conversion, dans leur ARN, de la base A (adénosine) en I (inosine). Les autres organismes – les nautilles, mais aussi les autres mollusques, les insectes et les vertébrés – n'ont que de rares recodages.



détectent une portion à éditer en reconnaissant les séquences de part et d'autre. En d'autres termes, pour qu'une portion à éditer persiste au fil de l'évolution, c'est-à-dire soit transmise de manière héréditaire, il est nécessaire que les séquences qui la flanquent en amont et en aval sur le génome soient conservées à l'identique, sans mutation. Pourtant, l'étude des cibles du système ADAR suggère que nombre d'entre elles seraient issues de transposons, des séquences d'ADN capables, au fil de l'évolution, de se déplacer dans le génome et de s'y multiplier de manière autonome, au point d'en constituer une grande partie (45% du génome humain, par exemple). Une pression de sélection stabilisante fige donc ces séquences autour des portions à éditer.

Mais augmenter le nombre de portions éditées revient à diminuer la fraction du génome qui peut évoluer classiquement. Il doit donc exister un seuil à partir duquel le gel évolutif d'un génome devient contre-productif. Les céphalopodes l'ont-ils atteint? Ils ont en tout cas développé un moyen original de se complexifier. Chez les vertébrés, le répertoire des protocadhérines, lui aussi important, est de fait produit par un autre mode d'édition: des «épissages alternatifs» compliqués où des parties des gènes sont omises lors de leur traduction en protéines. Ainsi, en suivant deux dynamiques évolutives distinctes, vertébrés et céphalopodes ont indépendamment accru leur production de protéines indispensables pour développer un cerveau complexe. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Liscovitch-Brauer et al., Trade-off between transcriptome plasticity and genome evolution in cephalopods, *Cell*, vol. 169, pp. 191-202, 2017.

C. Albertin et al., The octopus genome and the evolution of cephalopod neural and morphological novelties, *Nature*, vol. 524, pp. 220-224, 2015.

S. Alon et al., The majority of transcripts in the squid nervous system are extensively recoded by A-to-I RNA editing, *Elife*, 4:e05198, 2015.

K. Nishikura, A-to-I editing of coding and non-coding RNAs by ADARs, *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.*, vol. 17, pp. 83-96, 2016.

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](https://consignesdetri.fr)

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

L'AUTEUR



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

FAUSSES CASSANDRES ET VRAIS DANGERS

En matière d'alimentation, certaines études font des hypothèses alarmistes sans donner d'arguments valables. Elles risquent de nous empêcher de voir les vrais dangers alimentaires.

Un article récent de Xunyu Song et ses collègues de l'université de Dalian, en Chine, était consacré aux nanoparticules, objets dont au moins deux des trois dimensions dans l'espace sont inférieures à 0,1 micromètre (*J. Agric. Food Chem.*, vol. 66, pp. 7522-7530, 2018). Il expliquait que des blancs de poulet grillés ont à leur surface des nanoparticules et que ces dernières peuvent interagir avec des protéines telles que l'albumine sérique.

Ses auteurs agitent la peur en écrivant que les nanoparticules «pourraient passer à travers les membranes cellulaires dans l'intérieur du corps humain, et qu'elles entreraient inévitablement en contact avec les protéines du sang». Le catégorisme de la seconde moitié de la phrase est discutable: il faudrait déjà que le premier point soit avéré... Dans la même veine, Xunyu Song et ses coauteurs affirment que la production de nanoparticules «endogènes» durant le traitement thermique est un sujet très intéressant, parce que ces objets «peuvent avoir des effets biologiques inconnus après absorption orale». On ne pourrait dire plus juste... et moins précis.

Des nanoparticules dans l'alimentation inquiètent, alors que les micelles de caséines, dans le lait, en sont, et que toute matière colloïdale (il n'y a presque que cela en cuisine) contient nécessairement des nanoparticules. Il y aurait lieu d'un peu de circonspection et d'intelligence, et l'on pourrait même proposer que parler des nanoparticules en général soit intellectuellement aussi disqualifiant que de parler de ce qui est «bon pour la santé»: ici l'usage de la généralisation est une ignorance, une incompetence, voire une malhonnêteté.

De façon similaire, des équipes dosant de très petites quantités d'acrylamide

Les blancs de poulet grillés ont à leur surface des nanoparticules. Cela ne représente pas, en soi, un risque pour le consommateur.

avaient, il y a quelques années, alerté sur l'ensemble des produits amylacés cuits à haute température: pain, frites, pizzas, etc. Si l'acrylamide est en effet génotoxique et cancérigène, il est épidémiologiquement moins mauvais pour la santé que le gras chauffé des frites que l'on consomme en excès. Le détail ne doit pas faire oublier que le «gros» reste menaçant.

Car ce «gros» est donné, par exemple, dans un article lui aussi récent qui examine les risques des lectines des haricots blancs. Ces protéines de stockage sont connues dans les graines de légumineuses telles que les haricots. Elles se lient à l'épithélium intestinal et provoquent des désordres abdominaux et gastro-intestinaux: l'ingestion de haricots crus ou mal cuisinés peut conduire à des empoisonnements, avec vomissements ou diarrhées. Aussi les autorités américaines de santé recommandent-elles que les haricots soient bouillis pendant au moins 30 minutes.

Combien de ces lectines peut-on supporter? En cuisine, quand les haricots crus sont trempés pendant plusieurs heures, deux tiers des hémagglutinines sont lessivées... mais les concentrations restantes ont suffi à provoquer un accident chez 15 personnes en 1979. On aurait intérêt à se souvenir que les lectines ne sont entièrement détruites qu'après dix minutes de cuisson dans l'eau bouillante. Attention aux cuissons «douces».

«Pour digérer le savoir, il faut l'avoir avalé avec appétit», proposait Anatole France... ■



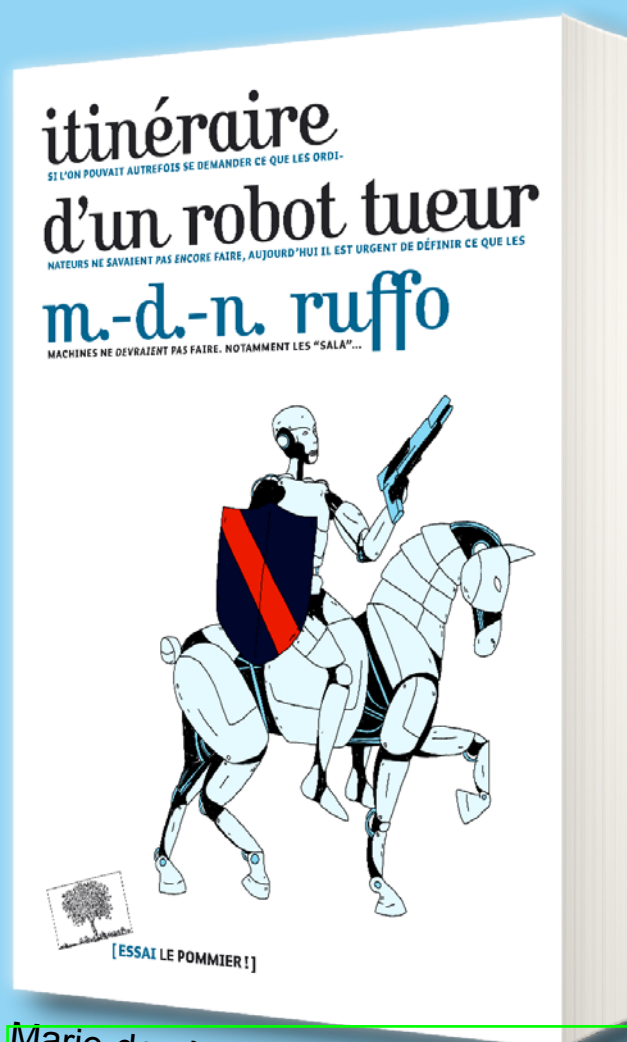
LA RECETTE

Une recette saine et délicieuse, malgré la présence de composés dangereux.

- 1 Dans une casserole, faire tremper des haricots blancs pendant 30 minutes dans de l'eau froide, remplacer l'eau, porter à ébullition pendant 15 minutes, puis jeter l'eau de cuisson. Réserver les haricots.
- 2 Faire revenir des oignons émincés et des blancs de poulet dans de la graisse de canard.
- 3 Quand les blancs de poulet ont bruni (présence de nanoparticules), ajouter les haricots blancs et remplir d'eau à hauteur.
- 4 Ajouter une feuille de laurier (contient des terpènes odorants, mais aussi des lactones et des alcaloïdes), deux clous de girofle (contient de l'eugénol, dont la dose journalière admissible est de 2,5 milligrammes par kilogramme de poids corporel), de la noix de muscade (contient de la myristicine hallucinogène, du safrole hépatotoxique et de l'élémicine, proche de la mescaline), du sel (accroît le risque de cancer de l'estomac).
- 5 Cuire à découvert jusqu'à ce qu'une peau apparaisse en surface; l'enfoncer, puis continuer la cuisson jusqu'à ce qu'une autre peau apparaisse, et répéter jusqu'à la formation de la septième peau.
- 6 Servir et consommer. Puis, quand la digestion sera terminée, faire un peu d'exercice.

Un enjeu de société, qui dépasse le simple champ de bataille.

Pour réfléchir aux enjeux
majeurs du remplacement
de l'humanité par des robots,
dans ses tâches,
ses décisions et ses devoirs.



Marie-des-Neiges Ruffo, 192 p. – 17€



Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.92

520 000 000

Une pieuvre compte environ 520 millions de neurones. C'est plus qu'une souris, qui en a 100 à 200 millions.

P.80

HACHAGE

Cette technique de cryptographie permet de créer des empreintes, notamment pour les mots de passe. Un hacker qui volerait les empreintes ne pourrait pas en déduire pour autant les mots de passe. Une précaution importante : en 2016, le groupe Yahoo! s'est fait voler les données de près d'un milliard de ses comptes.

P.7

« Le créationnisme et le complotisme reposent au moins en partie sur un biais cognitif, le biais téléologique. »

SEBASTIAN DIEGUEZ
chercheur à l'université
de Fribourg, en Suisse

P.42

9

La sonde BepiColombo réalisera neuf survols de planètes : un de la Terre, deux de Vénus et six de Mercure, avant la mise en orbite autour de cette dernière. Un voyage au tracé d'une extrême complexité.

P.24

CONTRAPOSITION

En logique, la contraposition consiste à déduire de la constatation « Si A, alors B » que « Si non-B, alors non-A ». Par exemple, s'il pleut, alors la route est mouillée. Et donc, si la route est sèche, on peut conclure qu'il ne pleut pas. C'est, semble-t-il, grâce à un tel raisonnement simple que l'on a évité une guerre nucléaire en 1983 !

P.56

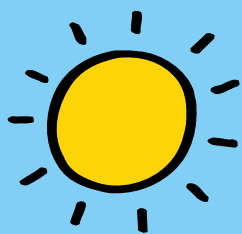
INÉGALITÉ

Lors d'une étude menée en 2007-2008 à la gare du Nord, à Paris, des sociologues ont observé que 29,4 % des usagers étaient non blancs, mais que 82,1 % des contrôles de police ont porté sur des non-Blancs.

P.34

CROCS

La pression exercée par les mâchoires de certains crocodiliens atteint 25 tonnes par centimètre carré. Elle n'est battue que par celle du *Tyrannosaurus rex*, qui aurait été de 30 tonnes par centimètre carré.



PROTÈGE LIVRES
ASTUCIEUX



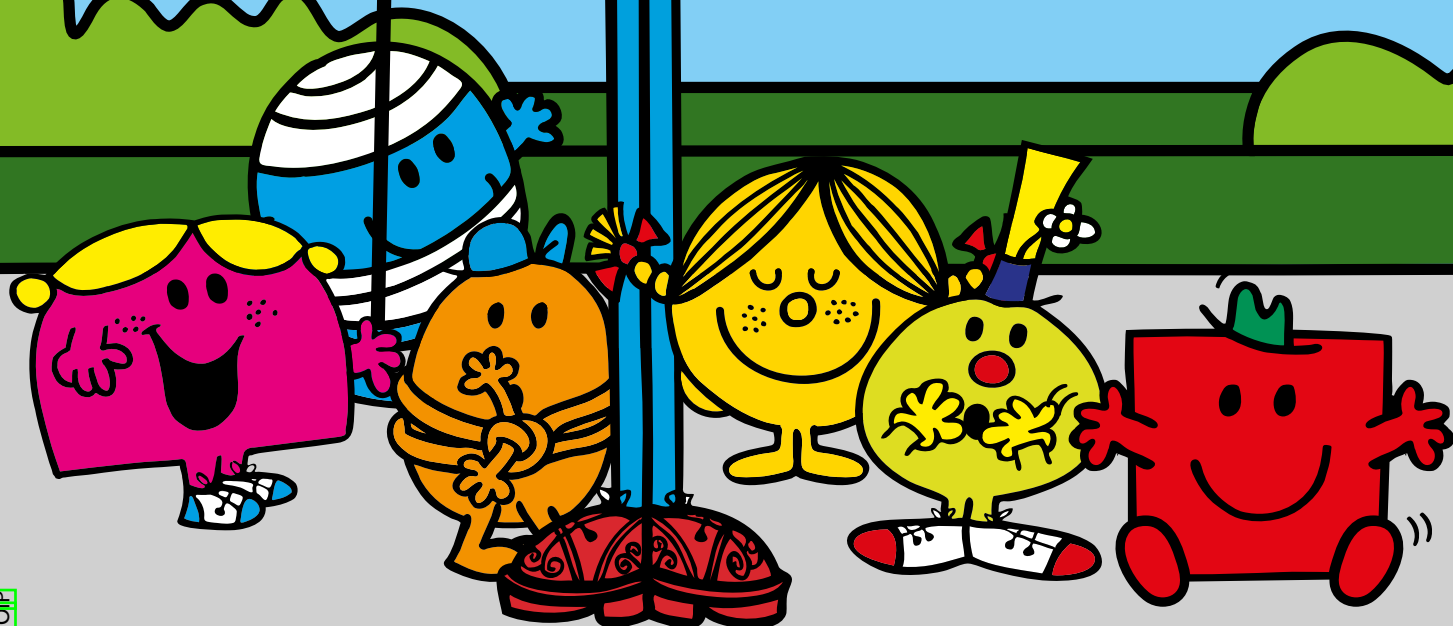
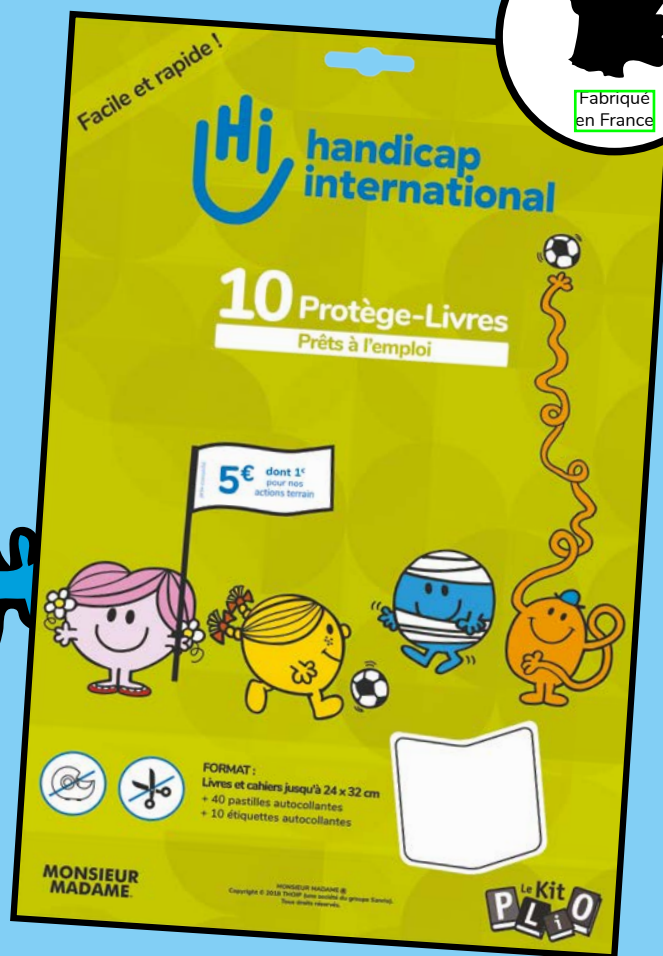
SANS CISEAUX
NI RUBAN
ADHÉSIF

UN GESTE
SOLIDAIRE
ET GÉNÉREUX

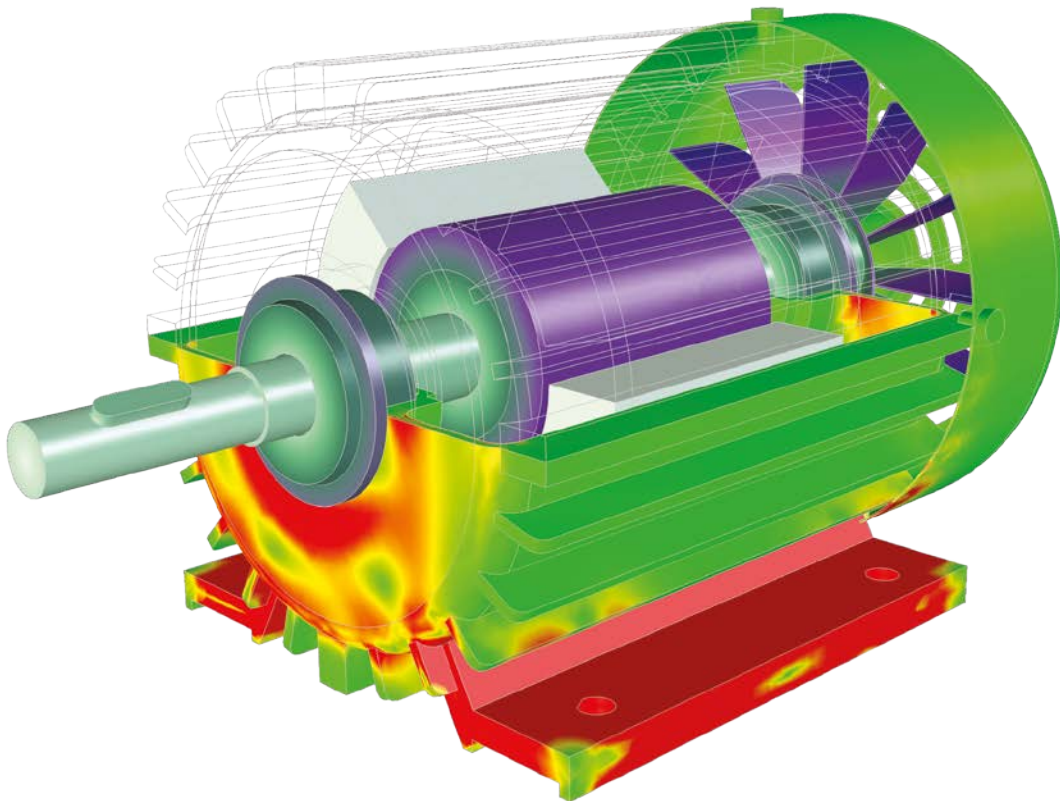


prix conseillé

5€ dont 1€
pour nos
actions terrain



Inventé au 19^{ème} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor