POUR LA SCIENCE
Edition française de Scientific American

GÉOPHYSIQUE
LA DYNAMO TERRESTRE, UN DÉFI CENTENAIRE

INFORMATIQUE
PROTÉGER SES DONNÉES GRÂCE À L'OFFUSCATION

HISTOIRE DES SCIENCES
CHUTE LIBRE : LES PÉRIPÉTIES D'UNE DÉVIATION

NOVEMBRE 2019
N° 505

THÉORIE DE L'ÉVOLUTION CONTRE CANCER

DES THÉRAPIES ADAPTATIVES À L'ESSAI

DOSSIER
LES MÉCANISMES DE LA DÉSINFORMATION
Comment les démonter

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous, l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses

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

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

CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI

POUR LA SCIENCE

ww.pourlascience.fr
70 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Pari
él. 01 55 42 84 00

roupe POUR LA SCIENCE
irectrice des rédactions: Cécile Lestienn

OUR LA SCIENCE
édacteur en chef: Maurice Mashaal
édactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnie
édacteurs: François Savatier, Sean Bailly
tagiaire: Lucas Gierczak

ORS-SERIE POUR LA SCIENCE
édacteur en chef adjoint: Loïc Mangi

éveloppement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
ommunity manager: Aëla Keryhuel

onception graphique: William Londiche
irectrice artistique: Céline Lapert
aquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
ngrid Leroy et Charlotte Calament
éviseuse: Anne-Rozenn Jouble
arketing & diffusion: Arthur Peys
hef de produit: Charline Buché
irection du personnel: Olivia Le Prévost
ecrétaire général: Nicolas Bréon
abrication: Marianne Sigogne et Séléna Berteloot
irecteur de la publication et gérant: Frédéric Mério
nciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry
t Philippe Boulanger
onseiller scientifique: Hervé This
nt également participé à ce numéro:
enjamin Abecassis, Étienne Berthier,
incent Bretagnolle, Maud Bruguière, Sophie Gallé-Soas,
ydie Morel, Mehdi Moussaïd, Xavier Müller,
runo Poucet, Marc-André Selosse, Simon Thomas,
ulie Villanova

RESSE ET COMMUNICATION
usan Mackie
usan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

UBLICITÉ France
tephanie.jullien@pourlascience.fr

BONNEMENTS
bonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.f
ourriel: pourlascience@abopress.fr
él. 03 67 07 98 17
dresse postale: Service des abonnements –
our la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,
7402 Illkirch Cedex

arifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
rance métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros
este du monde: 85,25 euros

IFFUSION
ontact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard
él. 04 88 15 12 48
nformation/modification de service/réassort:
ww.direct-editeurs.fr

CIENTIFIC AMERICAN
cting editor in chief: Curtis Brainard
resident: Dean Sanderson
xecutive vice president: Michael Florek
outes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou
rancophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus
ans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans
s livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à
Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
) Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction,
'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque
t le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de
cientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. »
n application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire
ntégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de
éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue
es Grands-Augustins, 75006 Paris).
rigine du papier: Autriche
aux de fibres recyclées: 30 %
Eutrophisation» ou «Impact
ur l'eau»: P... 0,007 kg/tonne

Certifié PEFC

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

PEFC
10-31-1282
pefc-france.org

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

UNE THÉORIE PERTINENTE, MAIS AUSSI UTILE

Cela fait exactement cent soixante ans, mois pour mois, que *L'Origine des espèces*, de Charles Darwin, œuvre qui a radicalement transformé le regard de la science sur le monde vivant et sur l'espèce humaine, est parue dans sa langue originale. Depuis, que de chemin parcouru par la théorie de l'évolution des organismes vivants sous l'effet de la sélection naturelle! Épaulée par les [illegible] s'est affermie, perfectionnée, complexifiée aussi, tout en permettant aux chercheurs en sciences de la vie de comprendre d'innombrables observations ou phénomènes, voire d'en prédire certains.

Les idées de la théorie de l'évolution se sont révélées utiles également dans d'autres domaines que la biologie: la psychologie et la sociologie, l'informatique avec les algorithmes évolutionnistes, la médecine avec la lutte antibactérienne ou contre d'autres vecteurs de maladies... Nous vous proposons ce mois-ci de découvrir un nouveau terrain d'application: les cancers. Le biologiste de l'évolution Frédéric Thomas nous brosse ainsi un panorama des apports de la théorie de l'évolution à la compréhension de ce type de pathologies qui, malgré les progrès de la médecine, restent redoutées (*voir pages 34 à 39*). Une approche qui n'est pas que théorique: comme le détaillent les spécialistes James DeGregori et Robert Gatenby, des thérapies s'appuyant sur les concepts évolutionnistes sont en train d'être testées, et les premiers résultats sont prometteurs (*voir pages 26 à 32*).

C'est là une illustration supplémentaire de la pertinence et de l'utilité de la théorie de l'évolution. Laquelle, malgré ses succès, subit toujours l'attaque de personnes et de groupes aux motivations non scientifiques. Ceux-ci propagent à son sujet un grand nombre de contre-vérités avec, aujourd'hui, l'appui d'internet et de ses «réseaux sociaux». Tel est l'un des innombrables tentacules de l'hydre de la désinformation actuelle – phénomène massif sur lequel *Pour la Science* vous propose un dossier de trois articles (*voir pages 51 à 73*). ■

SOMMAIRE

N° 505 /
Novembre 2019

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
La taille du proton
un problème persistant
Maladie d'Alzheimer :
un diagnostic plus précoce
Des archées d'Asgard
enfin en culture
La blancheur
la plus éclatante
Des rats qui jouent
à cache-cache
Climat : le rôle modérateur
des océans s'amenuise
La spectroscopie des trous
noirs est née
257 traces de pieds
néandertaliens en Normandie
Les oiseaux, victimes
d'un pesticide
Les prix Nobel 2019

P. 18
LES LIVRES DU MOI

P. 20
AGENDA

P. 22
HOMO SAPIENS
INFORMATICUS
Le monde est miniaturisable
Gilles Dowek

P. 24
QUESTIONS
DE CONFIANCE
La PMA, remède à l'infertilité sociale
Virginie Tournay

POUR LA SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION
NE MANQUEZ PAS LA PARUTION DE VOTRE MAGAZINE GRÂCE À LA NEWSLETTER
- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Inscrivez-vous www.pourlascience.fr

En couverture :
© Raphaël Quéruel

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS

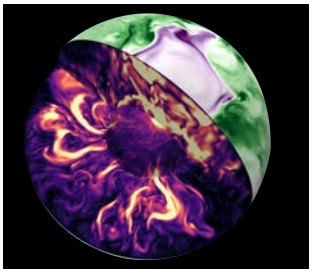
DOSSIER

P. 51 SCIENCES SOCIALES
Les mécanismes de la désinformation
Comment les démonter

P. 52
CONNAÎTRE L'ENNEMI : LES ROUAGES DE LA DÉSINFORMATION
Claire Wardle
Sur les réseaux sociaux, des agents malveillants exploitent notre propension à relayer des contenus sans réfléchir. *Via* des messages spécialement conçus pour être partagés très vite, ils manipulent nos opinions.

P. 68
ENSEIGNER L'ESPRIT CRITIQUE
Nicolas Gauvrit et Elena Pasquinelli
Face au flot d'informations qui nous inonde aujourd'hui, il est crucial d'exercer notre esprit critique en permanence afin de ne pas être abusés. Une façon de penser à acquérir dès l'école.

P. 60
COMMENT ENRAYER UNE ÉPIDÉMIE DE DÉSINFORMATION ?
Cailin O'Connor et James O. Weatherall
Des modèles décrivant la propagation des idées fausses montrent que conformisme et confiance sociale sont deux facteurs essentiels à exploiter dans la lutte contre la désinformation.



P. 40
GÉOPHYSIQUE
LA DYNAMO TERRESTRE, UN DÉFI CENTENAIRE
Emmanuel Dormy

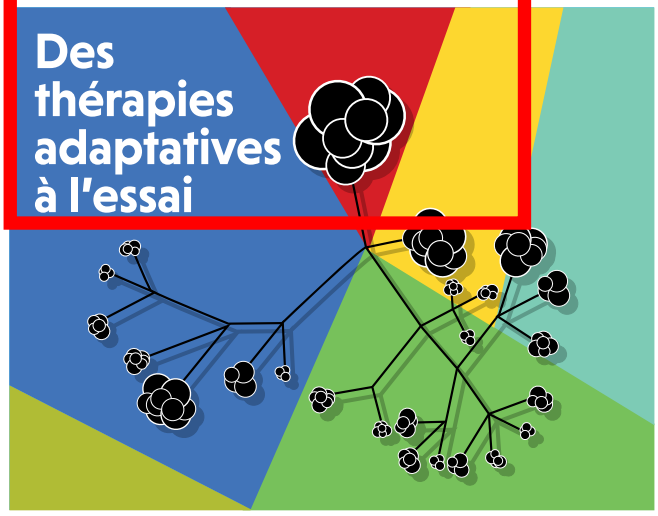
D'où provient le champ magnétique de la Terre? Il y a cent ans, Joseph Larmor proposait une réponse: un effet dynamo dû aux mouvements du fer liquide au sein du noyau terrestre. Calculs théoriques, simulations et expériences confirment ce scénario.

P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES
CHUTE LIBRE, HISTOIRE D'UNE DÉVIATION
Richard Taillet

Lâcher des objets du haut de tours ou dans des puits de mine: une expérience maintes fois répétée par des savants désireux de déterminer si leur chute était déviée vers l'est et vers le sud. La question intéresse encore les physiciens d'aujourd'hui.

À LA UNE

THÉORIE DE L'ÉVOLUTION CONTRE CANCER



P. 26
MÉDECINE
LA THÉORIE DE L'ÉVOLUTION, NOUVELLE ARME CONTRE LE CANCER
James DeGregori et Robert Gatenby

Comme tout système vivant, le cancer est soumis aux lois de la sélection naturelle. S'appuyant sur cette idée, de nouvelles stratégies contre cette maladie visent non pas à l'éradiquer à tout prix, mais à la maintenir sous contrôle.

P. 34
BIOLOGIE
« NOUS SOMMES TOUS AU MINIMUM DES CANCÉREUX ASYMPTOMATIQUES »
Entretien avec Frédéric Thomas

Et si le cancer était un processus inhérent à la vie des organismes complexes et soumis aux mêmes lois de l'évolution? Cette idée modifie radicalement notre compréhension de la maladie.

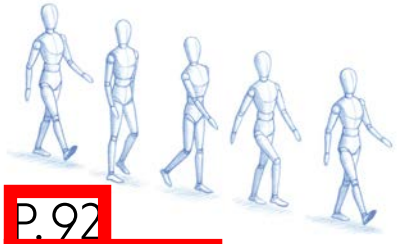
RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL
L'OFFUSCATION OU L'ART DE BROUILLER L'ÉCOUTE
Jean-Paul Delahaye

Puisque les espions ou les marchands veulent en savoir trop sur vous, donnez-leur satisfaction en les laissant s'emparer d'informations nombreuses... et fausses!

P. 86
ART & SCIENCE
Un peu plus près des étoiles
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
Quand le pont balance, les piétons dansent
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Le déclic évolutif des cichlidés du lac Victoria
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Renouveler le délice de la moutarde
Hervé This

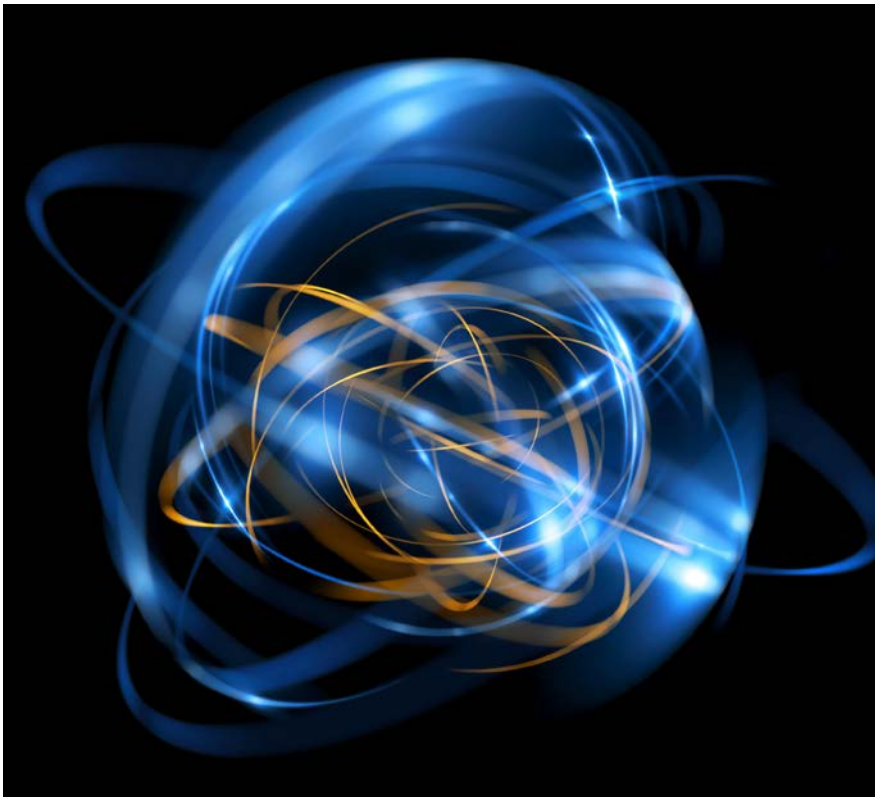
P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

P.6 *Echos des labos*
P.18 *Livres du mois*
P.20 *Agenda*
P.22 *Homo sapiens informaticus*
P.24 *Questions de confiance*

PHYSIQUE

LA TAILLE DU PROTON, UN PROBLÈME PERSISTANT



L'atome d'hydrogène *(ici une vue d'artiste)* est constitué d'un proton et d'un électron. En mesurant l'énergie nécessaire pour faire passer cet électron d'un état à un autre, on détermine la valeur du rayon de charge du proton.

Les mesures expérimentales du rayon du proton produisent deux ensembles de valeurs incompatibles. Celle effectuée par une équipe canadienne complique encore la situation.

Le proton est une particule composite, formée de quarks et de gluons. Sa charge électrique n'est donc pas ponctuelle, mais répartie à l'intérieur d'un certain volume. Les physiciens tentent depuis longtemps d'en mesurer le [illegible] trouvent soit un «grand rayon», soit un «petit rayon». Avec son équipe, Eric Hessels, de l'université de York, au Canada, vient de rajouter un petit rayon à la liste des résultats déjà obtenus.

Ces chercheurs ont mis en œuvre une mesure spectroscopique, c'est-à-dire qu'ils ont mesuré finement l'un des sauts d'énergie de l'électron dans l'atome d'hydrogène, dont le noyau est un simple proton. L'énergie de liaison de cet électron est en effet la somme de trois contributions. La première correspond à la liaison électromagnétique entre un électron et un proton supposé ponctuel; la seconde résulte des interactions de l'électron avec les fluctuations du vide, décrites par la théorie quantique des champs électromagnétiques; la troisième, enfin, traduit le fait que la charge du proton n'est pas ponctuelle. Or cette dernière contribution est proportionnelle au carré du rayon de la charge protonique. Ainsi, en ayant calculé par la théorie les deux premières contributions, on peut déterminer la valeur du rayon du proton à partir de mesures d'énergies électroniques.

Dans la pratique, les physiciens mesurent l'énergie du photon qui, absorbé par l'électron de l'atome, fait passer cet électron d'un état à un autre, d'énergie supérieure. Ainsi, après avoir produit une population d'atomes d'hydrogène dont l'électron est dans l'état noté 2S, les physiciens canadiens ont mesuré l'énergie du photon qui excite l'électron dans l'état noté 2P. De cette mesure de la «transition 2S-2P», ils ont déduit que le rayon de charge du proton est de 0,833 ± 0,01 femtomètre (1 femtomètre = 10^{-15} mètre).

Au sein de la communauté des physiciens atomiques, ce résultat ne passe pas

© Shutterstock.com

naperçu, car il recoupe la valeur spectaculairement précise obtenue en 2010 à l'institut Paul Scherrer, en Suisse, par la collaboration internationale Crema : 0,84087 ± 0,00039 femtomètre. Menée par Randolf Pohl, de l'institut Max-Planck de Garching, en Allemagne, avec notamment la participation de l'équipe de François Nez, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, cette vaste collaboration avait mesuré la transition 2S-2P en utilisant des atomes d'hydrogène où l'électron avait été remplacé par un muon, une particule similaire mais 207 fois plus lourde. Cette substitution a pour effet d'augmenter l'influence de la taille du proton dans l'énergie mesurée, d'où l'extrême précision atteinte. Ainsi, le résultat canadien montre que le « petit rayon » obtenu en 2010 se confirme lorsqu'on applique les techniques d'aujourd'hui à la mesure de la transition 2S-2P dans l'atome d'hydrogène ordinaire.

Cependant, une série d'autres mesures conduisent à un « grand rayon » du proton. Ce fut le cas en 2018 du rayon déduit de la mesure, par le laboratoire Kastler-Brossel, de la transition notée 1S-3S : 0,877 ± 0,01 femtomètre. Ce résultat était en accord avec ceux déjà obtenus ailleurs en mesurant les transitions 2S-4S et 2S-8S. À toutes ces mesures s'ajoute une mesure non spectroscopique effectuée par l'équipe de Jan Bernauer, de l'université de Mayence, en Allemagne, qui a étudié la diffusion d'électrons sur des protons : 0,875 ± 0,06 femtomètre. Étant donné la confusion due à la multiplication des mesures, le Comité de données pour la science et la technologie a résumé par une moyenne l'ensemble des mesures aboutissant à un « grand rayon » : sa valeur est de 0,879±0,005 femtomètre.

En résumé, deux groupes de résultats s'opposent, l'un autour de 0,84 femtomètre et l'autre autour de 0,88 femtomètre. Étant donné l'extrême précision de la mesure portant sur l'hydrogène muonique, peut-on conclure que le petit rayon est le bon ? En 2017, la mesure à Garching de la transition 2S-4P a produit un petit rayon et l'on attend du même institut les résultats de mesures portant sur les transitions 2S-6P et 1S-3S. Le bruit court qu'une mesure non spectroscopique (par diffusion d'électrons) non encore publiée a donné un petit rayon. L'énigme reste entière, et l'affaire est à suivre. ■

FRANÇOIS SAVATIER

N. Bezginov *et al.*, *Science*, vol. 365, n° 6457, pp. 1007-1012, 2019

NEUROSCIENCES

Maladie d'Alzheimer : un diagnostic plus précoce ?

Aujourd'hui, le diagnostic précoce de la maladie d'Alzheimer n'est pas fiable à 100 %. Récemment, cependant, l'équipe de Maxime Bertoux, de l'université de Lille, a proposé une nouvelle méthode fondée sur l'analyse des sillons du cerveau. Qu'en attendre ? Le point avec Bruno Dubois, directeur de l'IM2A, à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris.

Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

BRUNO DUBOIS
directeur de l'Institut de la mémoire et de la maladie d'Alzheimer (IM2A), à Paris

Comment fonctionne cette nouvelle méthode de diagnostic ?

Ces travaux sont de grande qualité. Chez 51 patients atteints de la maladie, les chercheurs ont analysé l'anatomie des sillons du cerveau – les circonvolutions du cortex – à l'aide d'un logiciel développé au CEA, qui permet de générer une sorte de moule numérique du cerveau à partir d'une imagerie par résonance magnétique (IRM). En étudiant la largeur des sillons et l'épaisseur du cortex alentour, ils ont ainsi remarqué un lien entre la largeur d'un groupe de sillons et la maladie. Ils ont ainsi pu retrouver l'état de santé des participants dans 91 % des cas et, d'un point de vue fondamental, montrer qu'il existe une relation entre le siège de l'atrophie cérébrale et les symptômes, ce qui est très intéressant en soi. Toutefois, la vraie question est : comment se situe cet outil dans les problématiques cliniques et de recherche actuelles ?

L'approche est alors moins concluante ?

Les chercheurs le disent eux-mêmes : la sensibilité de leur outil est d'autant plus grande que les patients sont à un stade avancé de la maladie. Et ce n'est pas surprenant : la largeur des sillons et l'épaisseur du cortex sont directement liées à la mort des neurones. Leur outil fournit donc une mesure indirecte de l'atrophie. Ainsi, plus le stade est précoce et plus le diagnostic est incertain. Or on cherche aujourd'hui à développer des outils sensibles à des stades très précoces. Et pour cela, on ne peut s'appuyer uniquement sur des marqueurs morphologiques, car ils ne sont plus assez spécifiques. Ce n'est pas parce que l'on détecte une atrophie que l'on est certain qu'elle est liée à la maladie d'Alzheimer. Elle pourrait être due à un accident vasculaire cérébral, par exemple.

De quels autres marqueurs dispose-t-on ?

On a recours à des marqueurs dits « physiopathologiques » : les concentrations de peptide bêta-amyloïde et de protéine tau. Durant la maladie, ces deux protéines s'accumulent et s'agrègent dans les neurones jusqu'à les détruire. Elles constituent des signatures formelles de la maladie – les seules à ma connaissance, malgré tout ce qu'on peut lire dans les médias. Leur détection reste un enjeu. On sait très bien les repérer par ponction lombaire, mais la méthode est invasive. Et dans le sang, leur détection reste d'une efficacité relative. Toutefois, même si l'on parvenait à des tests sanguins fiables à 100 %, ils ne suffiraient pas non plus à diagnostiquer la maladie. Le fait d'avoir une signature biologique de la présence des lésions, même chez des sujets qui n'ont pas de troubles cognitifs, ne signifie pas qu'ils vont développer la maladie. C'est ce que suggère l'étude Insight, que nous menons depuis 5 ans. Sur les 318 personnes suivies, toutes normales, sans troubles cognitifs, âgées de 77 ans en moyenne au début de l'étude, 88 se sont révélées porteuses de lésions amyloïdes dans le cerveau. Mais aujourd'hui, 5 ans plus tard, seulement 10 d'entre elles ont développé la maladie. Cela signifie que 78 personnes âgées de 82 ans en moyenne n'ont pas développé la maladie malgré leurs lésions. Tout le monde s'excite sur la recherche de biomarqueurs sanguins, mais je pense qu'il ne s'agit que de la première marche d'un escalier et qu'il en existe d'autres à découvrir pour le gravir.

Avez-vous des pistes ?

D'autres caractéristiques semblent se dégager chez les personnes de l'étude Insight qui ont développé la maladie, mais il est encore trop tôt pour en parler. Dix personnes, ce n'est pas assez pour confirmer nos hypothèses. Nous devons élargir notre étude et espérons que les institutions d'État entendront notre appel à l'aide pour la financer. Cette question est fondamentale pour l'avenir.

M. Bertoux *et al.*, *Neurobiology of Aging*, vol. 84, pp. 41-49, 2019

MICROBIOLOGIE

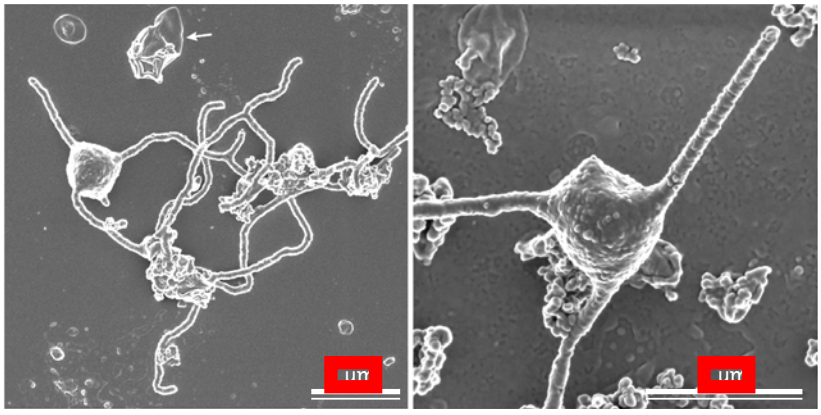
DES ARCHÉES D'ASGÅRD ENFIN EN CULTURE

Mises au jour en 2015, les archées d'Asgård n'étaient connues que par des fragments de génome. Des biologistes ont réussi à cultiver et observer ces microorganismes.

Il a fallu douze ans à Hiroyuki Imachi, de l'Agence japonaise de sciences et technologies terrestres marines, et ses collègues pour obtenir une culture d'un organisme très attendu des biologistes de l'évolution: une archée d'Asgård. Les archées – l'un des trois grands domaines du vivant, aux côtés [illegible] sons partie) – sont connues depuis plus de quarante ans. Mais celles d'Asgård n'ont été mises au jour que récemment, en 2015, et doivent leur nom au lieu de leur découverte: le château de Loki, des sources hydrothermales au large du Groenland. Toutefois, personne n'avait encore observé ces microorganismes. Leur description ne reposait que sur l'analyse de fragments de génomes récoltés dans les sédiments.

Cela n'avait pas empêché les biologistes de l'évolution de s'emparer de cette nouvelle branche du vivant, très intrigante. En effet, d'après l'analyse génomique, les archées d'Asgård s'étaient révélées les plus proches parents des eucaryotes: si elles n'avaient *a priori* ni noyau ni mitochondries (usines à énergie des cellules), elles arboraient des protéines que l'on pensait spécifiques des eucaryotes, impliquées dans la formation de vésicules ou d'un cytosquelette. Le dernier ancêtre commun de tous les eucaryotes leur ressemblait donc peut-être.

Mais sans preuve concrète, tout cela restait très hypothétique. C'est ce que l'équipe japonaise a fourni. Fin 2006, bien avant la découverte des archées d'Asgård, elle avait mis en culture des échantillons de sédiments prélevés en mer profonde au sud du Japon, dans des zones d'émanation de méthane. Son objectif était d'étudier les microorganismes de ces régions extrêmes. Ses conditions de culture imitaient donc celles du lieu de prélèvement. Au bout de cinq années, une communauté de microorganismes avait enfin assez prospéré pour qu'elle en cultive des échantillons dans des tubes en verre, sous diverses conditions. Il fallut attendre une année pour que l'un de ces tubes se trouble, signe que des microorganismes s'y étaient multipliés. Alors, patiemment, par cultures successives, l'équipe a abouti à une culture contenant trois microorganismes: une bactérie *Halodesulfovibrio* capable de réduire le sulfate, une archée *Methanogenium* productrice de méthane (méthanogène) et... une archée d'Asgård. Puis les biologistes ont réussi à cultiver les deux archées ensemble, sans la bactérie.



Au microscope électronique, l'archée d'Asgård cultivée ressemble à une très petite bactérie arrondie de 550 nanomètres de diamètre en moyenne. Elle présente parfois de curieux prolongements.

14 à 25 JOURS

EN CULTURE, L'ARCHÉE D'ASGÅRD DE HIROYUKI IMACHI ET SES COLLÈGUES DOUBLE SA POPULATION EN APPROXIMATIVEMENT 14 À 25 JOURS, CONTRE QUELQUES DIZAINES DE MINUTES À QUELQUES HEURES POUR D'AUTRES ARCHÉES.

Les deux archées vivent en syntrophie, une symbiose où l'une nourrit l'autre. L'archée d'Asgård est, de plus, aussi capable de vivre en syntrophie avec la bactérie *Halodesulfovibrio*. En s'appuyant sur ces observations, les biologistes ont proposé un nouveau modèle d'apparition des eucaryotes: avant l'oxygénation massive de l'atmosphère, il y a environ 2,4 milliards d'années, les archées d'Asgård vivaient en syntrophie avec des archées méthanogènes. Puis, quand les océans se sont oxygénés, une symbiose plus avantageuse s'est mise en place entre des archées d'Asgård et des bactéries réductrices de sulfate. Certaines archées ont aussi commencé des échanges avec des bactéries utilisant l'oxygène, jusqu'à les envelopper de prolongements (tels ceux observés en culture, *voir ci-dessus*) et former un microorganisme comportant une sorte de noyau – le matériel génétique de l'archée encerclé d'une membrane – et une bactérie endosymbiotique – l'ancêtre des mitochondries.

L'équipe japonaise n'en est pas au premier microorganisme découvert grâce à sa méthode. Peut-être isolera-t-elle d'autres membres du groupe d'Asgård? Car il en faudra encore beaucoup pour confirmer son scénario. ■

M.-N. C.

H. Imachi *et al.*, *Biorxiv*, 6 août 2019
https://doi.org/10.1101/726976

EN BREF

UNE FORÊT NOIRE DE CARBONE

En cherchant à améliorer la conductivité thermique et électrique d'une surface d'aluminium, Brian Wardle et Kehang Cui, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), ont fortuitement créé un matériau qui bat le record de noirceur. Absorbant environ 99,995 % de la lumière, contre 99,965 % pour le Vantablack, il est constitué d'une « forêt » de nanotubes de carbone. Le mécanisme sous-jacent n'est pas totalement compris, mais des applications optiques contre la lumière parasite en astronomie sont déjà envisagées.

PLUIE D'OBJETS INTERSTELLAIRES

Après 'Oumuamua en 2017, un second objet d'origine interstellaire, 2I/Borisov, a été observé dans le Système solaire en août 2019. Comment ces corps sont-ils arrivés ici ? Pour Gregory Laughlin et Malena Rice, de l'université Yale, des protoplanètes massives et éloignées de leur étoile éjecteraient ces corps hors de leur système planétaire. Ces objets venus de loin seraient même plus nombreux qu'on ne le pense et seraient une source d'information précieuse sur les milieux où ils sont nés.

DES MOUSTIQUES GRANDS VOYAGEURS

On pensait que les moustiques voyageaient près du sol et parcouraient au plus quelques kilomètres au cours de leur vie. L'équipe de Tovi Lehmann, de l'Institut américain pour les allergies et les maladies infectieuses, aux États-Unis, a montré que certaines espèces africaines parcouraient jusqu'à 295 kilomètres en une nuit, en se laissant porter par des courants aériens jusqu'à 290 mètres de hauteur. Cette découverte surprenante expliquerait leur retour rapide au Sahel après la saison sèche et permettrait de mieux comprendre la propagation de certaines maladies.

GÉOSCIENCES

UN SUIVI DU POINT CHAUD DES AÇORES

Hawaii, la Réunion, l'Islande… Autant d'îles volcaniques engendrées par un point chaud, c'est-à-dire par la remontée [illegible] profonde. Quand le panache arrive près de la surface, la pression diminue et les roches fondent partiellement en un magma, ce qui peut donner des volcans. Les géologues ont longtemps pensé que ces points chauds étaient fixes, et ils les ont donc utilisés pour étudier le mouvement absolu des plaques tectoniques. Mais depuis plusieurs années, de nombreux indices ont remis en cause cette hypothèse. Maëlis Arnould, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues ont ainsi voulu suivre le point chaud de l'archipel portugais des Açores, dans l'Atlantique.

Les chercheurs ont d'abord étudié la zone anormalement chaude autour de ces îles. Elle s'étend de façon asymétrique et s'étale sur 2 000 kilomètres au sud des Açores et sur 500 kilomètres au nord. Cette distribution témoigne d'un déplacement du point chaud, mais il restait à le distinguer du mouvement de la plaque tectonique et à le quantifier.

Les chercheurs ont alors développé un modèle numérique en trois dimensions des mouvements de roches dans le manteau terrestre, qui prend en compte les déplacements éventuels des plaques tectoniques et des points chauds. Sachant, grâce à d'autres observations, que la plaque tectonique se déplace vers le nord, les chercheurs ont déduit que la seule configuration qui rende compte des observations est celle où le point chaud se déplacerait aussi vers le nord, mais plus rapidement que la plaque, à une vitesse estimée de 1 à 2 centimètres par an. L'étude des anomalies thermiques fournit ainsi de précieux renseignements sur les mouvements des points chauds. Mais la cause de ces mouvements, qui s'ancrent très profondément dans le manteau terrestre, reste pour l'instant une énigme. ■

Les Açores sont des îles volcaniques nées de l'activité d'un point chaud au large du Portugal.

NICOLAS BUTOR

M. Arnould *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 3235, 2019.

CHIMIE

DES « GEMMES » POUR LA CATALYSE

Les piles à combustible dépendent de façon cruciale de processus qui sont catalysés grâce à des nanoparticules. Or les modes [illegible] métalliques (par thermolyse, c'est-à-dire par chauffage à environ 1 000 °C) produisent des catalyseurs aux performances moyennes.

En principe, la forme des nanoparticules peut avoir une influence sur leurs propriétés. Liliang Huang et ses collègues, de l'université Northwestern, aux États-Unis, ont mis au point une nouvelle méthode pour produire des composés qui prennent la forme de cristaux tétrakihexaédriques, des solides réguliers à 24 faces. Les chercheurs ont modifié les stratégies classiques de thermolyse. Ils ont ajouté un élément annexe (plomb, bismuth, antimoine ou tellure) qui se mélange au métal principal pour produire des tétrakihexaèdres. En poursuivant le chauffage, l'élément annexe se vaporise et laisse des nanoparticules pures. Les tests montrent que ce nouveau matériau est 20 fois plus efficace que les catalyseurs commerciaux classiques des piles à combustible. ■

Les nanoparticules métalliques *(en fausses couleurs)* à 24 faces sont des catalyseurs efficaces.

MARTIN TIANO

L. Huang *et al.*, *Science*, vol. 365, pp. 1159-1163, 2019.

LA BLANCHEUR LA PLUS ÉCLATANTE

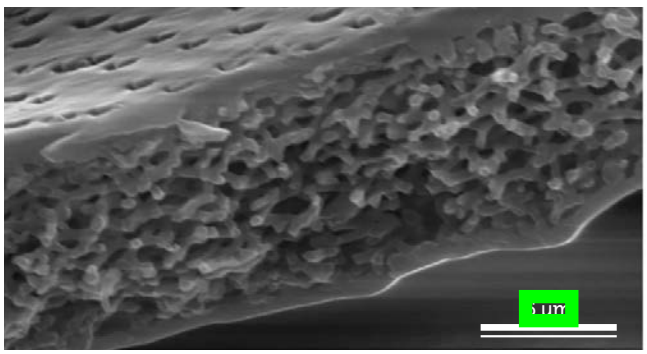
Les minuscules écailles qui recouvrent la carapace des coléoptères asiatiques de l'espèce *Lepidiota stigma* (*ci-contre, gros plan sur la tête et le thorax*) ou du genre *Cyphochilus* sont d'une blancheur extrême, parmi les blancs les plus éclatants que l'on connaisse. Une équipe, majoritairement britannique, menée par Andrew Parnell, de l'université de Sheffield, [illegible] polymère qui imite celle-ci.

L'examen des écailles a été effectué par nanotomographie aux rayons X à l'ESRF, le synchrotron européen situé à Grenoble. Il a montré que ces éléments très opaques sont faits de chitine poreuse où l'air occupe environ 69% (pour *Cyphochilus*) et 66% (pour *L. stigma*) du volume. Comme l'indiquent des calculs théoriques et des simulations numériques, cette structure (*voir l'image ci-dessous*) diffuse et réfléchit très bien la lumière, d'où sa blancheur éclatante. La blancheur optimale correspondrait à une architecture de même type où l'air occuperait 75% du volume.

Andrew Parnell et ses collègues ont aussi montré que ces structures rappellent celles produites par «décomposition spinodale», un processus où un mélange homogène de deux liquides se dissocie, à l'échelle microscopique, en ses composants. Les chercheurs ont alors synthétisé un film mince, par décomposition spinodale d'un mélange à base d'acétate de cellulose et de dichlorure de calcium, puis vitrification. D'une douzaine de micromètres d'épaisseur comme les écailles, cette couche solide présente une blancheur encore plus éclatante (sa réflectance est d'environ 94%, contre 90% et 88% pour les écailles des deux coléoptères). Un tel matériau pourrait avantageusement servir de substitut aux nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2), utilisées notamment dans les peintures blanches et en tant qu'additif alimentaire, mais soupçonnées de toxicité. ■

MAURICE MASHAAL

. Burg *et al.*, *Communications Chemistry*, vol. 2, article 100, 2019



1 mm

ÉTHOLOGIE

DES RATS QUI JOUENT À CACHE-CACHE

Les enfants de toutes les cultures humaines connaissent et pratiquent le jeu de cache-cache. Mais est-il l'apanage des humains? [illegible] Humboldt de Berlin, et ses collègues ont entraîné de jeunes rats à jouer à cache-cache avec eux – à trouver un abri, mais aussi à débusquer les chercheurs qui se cachaient.

Durant la phase d'apprentissage qui n'a duré que deux semaines, les rongeurs ont gagné en vitesse. Ils ont aussi fait montre d'une profonde compréhension des règles du jeu, et même de stratégie. Ils menaient leurs recherches de façon systématique, en commençant par des cachettes déjà visitées. Quand ils se cachaient, ils choisissaient des boîtes opaques plutôt que transparentes et restaient très silencieux.

Les rats ont exprimé beaucoup d'enthousiasme, qui se traduisait par des bonds de joie et des sons expressifs. Pour cette raison, Annika Reinhold et ses collègues pensent que les rats jouaient pour le plaisir de jouer, et non par quête de récompense.

Six rats ont appris à jouer à cache-cache, à s'abriter ou à débusquer leurs partenaires de jeu : les chercheurs

Des analyses neuronales durant le déroulement du jeu ont montré une forte activité du cortex préfrontal qui variait en fonction du rôle endossé par le rat, ce qui suggère que ce type d'activité est bien ancré dans l'histoire évolutive de ces animaux. Il reste cependant à élucider de nombreuses questions quant aux mécanismes cognitifs et physiologiques impliqués dans ce comportement. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

A. Reinhold *et al.*, *Science*, vol. 365, pp. 1180-1183, 2019

EN BREF

TITAN : DES CRATÈRES D'EXPLOSION

Sur Titan, la plus grosse lune de Saturne, certains lacs de méthane se sont formés dans des cratères, mais ces derniers ne sont pas tous le fruit d'impacts. C'est ce qu'avance l'équipe de Giuseppe Mitri, de l'université de Chieti, en Italie : certains seraient nés lors d'explosions souterraines ! Cependant, comme l'atmosphère de Titan ne contient pas de dioxygène, elles ne peuvent être le résultat d'un phénomène de combustion. Après avoir étudié les lacs ayant des bords très abrupts, les chercheurs pensent que des poches d'azote liquide ont été réchauffées par l'activité géologique de la planète. La détente violente liée au passage rapide de l'azote à l'état gazeux suffirait à expliquer la forme de ces cratères.

LUCAS GIERCZAK

CLIMAT : LE RÔLE MODÉRATEUR DES OCÉANS S'AMENUISE

Le Giec vient de dresser un panorama détaillé de l'évolution des océans et de la cryosphère dans le contexte du réchauffement climatique, et de son impact sur les populations.

Hausse du niveau de la mer, réchauffement, acidification, fonte des glaciers... Pour faire le point sur la situation actuelle et les projections d'évolution, dans les décennies à venir, des océans et de la cryosphère (les régions englacées de la planète), [illegible] chercheurs de 36 pays ont analysé quelque 7 000 publications scientifiques. Leurs conclusions font l'objet d'un rapport spécial du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

L'un des principaux messages de ce rapport est que l'océan a joué jusqu'à présent un rôle modérateur dans le réchauffement climatique : depuis les années 1970, il a absorbé plus de 90% de l'excès de chaleur produit par l'effet de serre d'origine anthropique. Il pourrait encore capter jusqu'à 5 à 7 fois plus de chaleur d'ici à 2100. Mais cela n'est pas sans conséquence : depuis 1993, la vitesse de réchauffement des océans a plus que doublé. Et, par exemple, la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur océaniques ont augmenté.

Cet accroissement de la température s'accompagne d'une acidification (par l'absorption du dioxyde de carbone atmosphérique, estimée à entre 20 et 30% des émissions anthropiques depuis les années 1980) et d'une diminution de la teneur en oxygène des eaux. L'ensemble de ces effets a un impact fort sur les écosystèmes et constitue une menace pour la biodiversité marine. Les différentes études prévoient une baisse de la biomasse de 15% d'ici à la fin du siècle. Ces phénomènes se répercuteront sur l'industrie de la pêche et les populations qui en vivent – plus de trois milliards de personnes dépendent des ressources alimentaires des océans.

L'autre volet du rapport est l'évolution de la cryosphère. De façon globale, elle est en recul sous l'influence directe de la hausse de la température de l'air. Tous les milieux sont touchés : l'Arctique, l'Antarctique, le Groenland, le pergélisol, les glaciers de montagnes. Avec la fonte des glaces, associée à l'expansion thermique des océans, le niveau de la mer, qui augmentait de 3,6 millimètres par an durant la dernière décennie, continuera de croître, mais

Dans une étude récente, Inès Dussaillant, du laboratoire Legos, à Toulouse, et ses collègues ont montré que la presque totalité des 19 000 glaciers andins sont en recul (ici, Upsala, en Argentine).

+ 7 °C

[illegible] ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE NE SONT PAS MAÎTRISÉES, LA HAUSSE DE TEMPÉRATURE GLOBALE QUE L'ON POURRAIT ATTEINDRE EN 2100 (PAR RAPPORT À L'ÈRE PRÉINDUSTRIELLE). CETTE PRÉVISION EST CELLE DE DEUX NOUVEAUX MODÈLES CLIMATIQUES ÉLABORÉS DANS DES LABORATOIRES FRANÇAIS.

Source : http://bit.ly/PLS505_Clim7

à un rythme plus soutenu. Son amplitude dépendra fortement des politiques qui seront menées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Mais l'estimation moyenne pour la hausse globale serait de 0,84 mètre en 2100. Ces estimations sont plus élevées que celles du précédent rapport du Giec (en 2013), notamment parce que la fonte de l'Antarctique et du Groenland a été affinée et réévaluée à la hausse.

Dans un tel contexte, on peut s'attendre à voir une augmentation de la fréquence d'inondations exceptionnelles. Certaines îles et villes côtières situées à faible élévation seraient alors fortement menacées – sachant que près de 11% de la population mondiale vit à moins de 10 mètres au-dessus du niveau de la mer.

« Malgré des projections d'impact très inquiétantes si les rejets de gaz à effet de serre ne sont pas réduits drastiquement et rapidement, ce rapport fournit un message positif. Il montre qu'un scénario d'émission compatible avec l'accord de Paris permettrait de stabiliser ou modérer les impacts. L'état de l'océan futur est donc entre nos mains », conclut Jean-Pierre Gattuso, l'un des auteurs du rapport et directeur de recherche du CNRS à Sorbonne-Université et à l'Iddri. ■

SEAN BAILLY

Rapport spécial du Giec : https://www.ipcc.ch/srocc/home

ASTROPHYSIQUE

LA SPECTROSCOPIE DES TROUS NOIRS EST NÉE

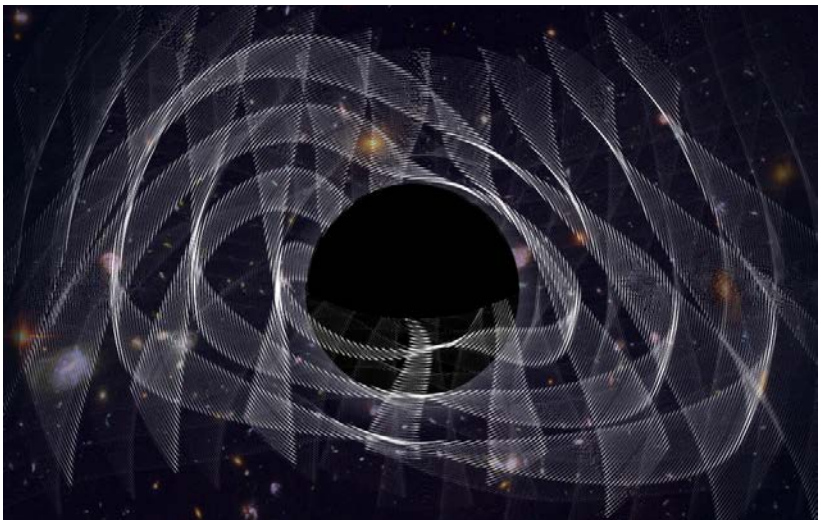
En analysant les ondes gravitationnelles émises par un trou noir en vibration, une équipe d'astrophysiciens a pu déterminer les caractéristiques de l'astre.

Le 14 septembre 2015, l'interféromètre laser géant *Ligo*, aux Etats-Unis, a enregistré pour la première fois un signal d'ondes gravitationnelles, ces vibrations de l'espace-temps prévues par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. La collaboration internationale [illegible] GW150914, provenait de la fusion de deux trous noirs qui ont donné naissance à un nouveau trou noir plus massif. Ce dernier, étant très déformé, s'est mis à vibrer pendant une brève phase de transition de façon à réorganiser sa structure, une phase nommée *ringdown*. Le système émet des ondes gravitationnelles pendant tout le processus de coalescence. Mais il était difficile d'isoler celles correspondant à ces vibrations finales. Avec ses collègues, Maximiliano Isi, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) et de la collaboration *Ligo*, a proposé une nouvelle méthode pour isoler ces signaux.

A l'image d'une cloche, le trou noir en vibration émet un ensemble d'ondes gravitationnelles qui s'amortissent très vite et qui présentent un spectre spécifique de fréquences, nommées modes quasi normaux (chacun correspondant à un mode de vibration du trou noir). Or l'analyse de ce spectre est intéressante car on peut en déduire les caractéristiques du trou noir: sa masse et son moment cinétique, voire sa charge électrique (*a priori* négligeable pour un objet astrophysique). On parle alors de spectroscopie des trous noirs, à l'instar de la spectroscopie du rayonnement électromagnétique des atomes qui permet de déterminer les propriétés de ceux-ci.

Lors de la détection de GW150914, la collaboration *Ligo-Virgo* avait présenté des indices de la détection du mode quasi normal fondamental, le plus intense. Mais on pensait que les harmoniques (les modes de fréquence supérieure, ou *overtones*) étaient trop faibles pour être détectés. Pire, pour garantir un signal pur correspondant uniquement au *ringdown*, la collaboration *Ligo-Virgo* avait choisi d'analyser seulement les données enregistrées bien après le pic correspondant à la collision (et donc déjà très amorties).

Maximiliano Isi et ses collègues ont repris les données de GW150914 et ont développé une nouvelle technique pour isoler les modes quasi normaux juste après le pic. En identifiant ainsi le mode fondamental et un *overtone*, ils ont pu reconstruire une partie du signal du *ringdown* pour l'analyser – et calculer les propriétés du trou noir, qui se révèlent en accord avec celles déduites de *Ligo-Virgo* et de la relativité générale.



Lorsque deux trous noirs fusionnent, le nouveau trou noir formé vibre très brièvement et émet des ondes gravitationnelles, que l'on a réussi à isoler de celles émises lors de la collision.

3

C'EST, EXPRIMÉE EN MASSES SOLAIRES, L'ÉNERGIE QUI A ÉTÉ ÉMISE LORS DE LA COALESCENCE GW150914. LES DEUX TROUS NOIRS PRÉCURSEURS AVAIENT UNE MASSE DE 29 ET 36 FOIS CELLE DU SOLEIL, LE TROU NOIR RÉSULTANT NE FAISANT QUE 62 MASSES SOLAIRES.

«Sans pour autant minimiser l'importance des travaux antérieurs, on peut dire que cette étude marque réellement la naissance de la spectroscopie expérimentale des trous noirs. C'est très enthousiasmant, car nous attendons de plus en plus de signaux, et de meilleure qualité, dans un avenir proche», souligne Olivier Minazzoli, du centre scientifique de Monaco et de l'observatoire de la Côte d'Azur, et membre de la collaboration *Virgo*.

Avec *Ligo* et *Virgo*, un nouvel interféromètre, *Kagra*, au Japon, devrait bientôt participer à la chasse aux ondes gravitationnelles. Il sera alors possible d'enregistrer des événements de coalescence avec plus de détails et observer des modes de vibration plus faibles. Et si certains d'entre eux dévient des prédictions de la théorie d'Einstein, on disposera là de précieux indices pour la recherche d'une théorie quantique de la gravitation. ■

S. B.

M. Isi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, article 111102, 2019

INFORMATIQUE

QUANTIQUE : BRUIT DE SUPRÉMATIE

Sur le site de la Nasa, un article, bien que rapidement retiré, n'est pas passé inaperçu. Une équipe de Google et des cher- [illegible] Preskill a nommé, en 2012, la « suprématie quantique ». Il s'agit du stade où un ordinateur quantique est capable de réaliser un calcul (même inutile) qui serait impossible, ou alors extrêmement long, sur un ordinateur classique.

L'équipe aurait réussi cette performance avec un ordinateur quantique à 53 qubits. Le calcul réalisé a été choisi de façon à être difficile dans une architecture classique et optimal sur la machine quantique de Google. L'équipe s'est assurée que son résultat, obtenu en deux minutes, était fiable. Un ordinateur classique aurait eu besoin de près de 10000 ans. C'est un pas important vers l'ordinateur quantique, mais il reste un long chemin à faire avant que l'on puisse effectuer des calculs utiles. ■

S. B.

Pour en savoir plus : http://bit.ly/PLS505_SupQuan

BIOLOGIE

POLLUTION DANS LE PLACENTA

Tout au long de la grossesse, le placenta joue plusieurs rôles essentiels pour le fœtus, dont celui de filtre biochimique [illegible] l'on se préoccupe des problèmes de la pollution atmosphérique et de la qualité de l'air, l'équipe de Tim Nawrot, de l'université de Hasselt, en Belgique, vient de montrer que des nanoparticules carbonées issues de la combustion des carburants peuvent traverser ce filtre et se loger sur la face fœtale du placenta, et ce très tôt durant la grossesse.

Les chercheurs ont aussi extrapolé l'exposition de femmes ayant toutes accouché dans la région du Limbourg, dans le nord-est de la Belgique, sur la base de leur adresse et des données de pollution captées près de chez elles. Ils ont ainsi montré une corrélation entre le nombre de particules de carbone dans le placenta et l'exposition environnementale. D'autres études seront nécessaires pour dire si cette contamination du placenta entraîne des conséquences pour le développement du fœtus. ■

NOËLLE GUILLON

H. Bové *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 3866, 2019

PRÉHISTOIRE

257 TRACES DE PIEDS NÉANDERTALIENS EN NORMANDIE

Une des 257 empreintes de pied néandertalien – qui semble large et robuste – trouvées au Rozel

Avec des collègues, Jérémy Duveau, du Muséum national d'histoire naturelle, a étudié des centaines d'empreintes de pieds néandertaliens découvertes sur le site du Rozel, dans le Cotentin. Ces chercheurs en ont conclu que ces traces ont été imprimées par un groupe constitué d'une majorité d'enfants et de jeunes.

Le site du Rozel est un système de dunes anciennes, où le sable apporté par le vent a scellé cinq sols anciens dans une boue sableuse. Leur fouille [illegible] L'étude géochronologique a montré qu'ils datent d'environ 80000 ans. Dans chacune des cinq strates, les fouilleurs ont mis au jour des outils de pierre de l'industrie moustérienne typique des Néandertaliens du Paléolithique moyen (350000 à 45000 ans avant le présent). Les empreintes du Rozel sont donc néandertaliennes. Or on ne disposait jusqu'ici que de 9 traces néandertaliennes.

Le paléosol noté D3b-4 porte 80% des empreintes découvertes. Les chercheurs l'ont donc choisi pour tenter de reconstituer la composition du groupe qui l'a foulé. En se fondant sur des données anthropométriques, ils ont conclu que l'on peut estimer la taille des Néandertaliens du Rozel en multipliant la longueur du pied par 6,5 (à des incertitudes près). Ils parviennent ainsi à la conclusion qu'entre 10 à 13 individus mesurant de 66 à 189 centimètres ont foulé D3b-4. Or les 20 squelettes néandertaliens à peu près complets connus correspondent à des statures comprises entre 147 et 177 centimètres. Le Rozel suggère donc l'existence de grands Néandertaliens, même si, compte tenu des incertitudes, les chercheurs ne sont sûrs que de la présence d'un enfant de 2 ans et d'un adulte d'au moins 1,75 mètre. Quoi qu'il en soit, tous avaient des pieds très larges (*voir la photo ci-dessus*).

En appliquant aux Néandertaliens du Rozel la courbe donnant la stature en fonction de l'âge chez *Homo sapiens*, les chercheurs en déduisent que la très grande majorité des individus ayant foulé D3b-4 étaient des jeunes. Cette constatation surprend, car les chasseurs-cueilleurs vivent en petits clans nomades comportant de 10 à 30 personnes au maximum, où une certaine parité adultes-jeunes doit régner : il faut en effet pouvoir entraîner les jeunes avec soi, voire porter les enfants. De fait, la seule comparaison possible – un groupe familial néandertalien fossilisé en une fois il y a quelque 49000 ans dans la grotte d'El Sidrón, en Espagne – comprenait 3 hommes, 4 femmes, 3 adolescents et 3 enfants, ce qui suggère un ratio jeunes/adultes de 6/7, pratiquement à l'équilibre... ■

E. S.

J. Duveau *et al.*, *PNAS*, vol. 116(39), pp. 19409-19414, 2019

ENVIRONNEMENT

UN INSECTICIDE QUI NUIT AUX OISEAUX

Les néonicotinoïdes sont les insecticides les plus utilisés dans le monde depuis l'interdiction globale, dans les années 1970 [illegible]. Particulièrement efficaces, même à faibles concentrations, ces substances attaquent le système nerveux central des insectes et sont, aux États-Unis, principalement utilisés pour protéger les cultures de maïs. Plusieurs études ont déjà démontré l'implication des néonicotinoïdes dans l'effondrement de populations d'abeilles et d'autres invertébrés, mais les vertébrés pourraient aussi être victimes de ces produits. Récemment, l'équipe de Christy Morrissey, de l'université de Saskatchewan, au Canada, a révélé les effets délétères de ces insecticides sur les oiseaux migrateurs.

Les chercheurs ont capturé 36 bruants à couronne blanche, des oiseaux granivores, en pleine migration du Mexique vers le Canada. Un tiers de ces oiseaux ont été nourris avec de l'huile contenant jusqu'à un dixième de la quantité

Les bruants à couronne blanche qui absorbent un néonicotinoïde souffrent de désorientation temporaire

d'insecticide (de l'imidaclopride) que l'on trouve sur un simple grain de maïs.

En seulement six heures, les bruants ayant assimilé la plus grande dose d'imidaclopride avaient perdu 6% de leur masse corporelle. Les oiseaux souffraient aussi de désorientation temporaire, qui retarde la reprise de la migration. Un effet qui pourrait réduire les chances de trouver un partenaire et d'établir un nid.

W. R.-P.

M. L. Eng *et al.*, *Science*, vol. 365, pp. 1177-1180, 2019

EN BREF

PISSENLIT OPTIMISÉ

Surmontés d'un pappus (un faisceau de filaments blancs) qui contribue à augmenter leur portance, les akènes de pissenlit transportent les graines sur de grandes distances. En modélisant le système, François Gallaire, de l'EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne), en Suisse, et ses collègues ont cherché quel est le nombre optimal de filaments dans un pappus qui assure un vol stable et efficace. Un trop grand nombre de filaments empêche l'air de circuler dans le pappus et déstabilise l'akène. Cependant, avec trop peu de filaments, la portance est insuffisante. Résultat : le parfait compromis se situerait aux alentours d'une centaine de filaments, et c'est bien l'ordre de grandeur pour les véritables pissenlits !

LAZIA PÉTILLON

Direction des relations avec les entreprises
cnrs formation entreprises
Organisme de formation continue
250 formations technologiques courtes proposées par le CNRS dans ses laboratoires de recherche
pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens
Domaines de formation
Big data et IA, génie logiciel, sciences de l'ingénieur, chimie, biologie, microscopie, urbanisme, enjeux sociétaux... et plus encore
+ de 1600 stagiaires en 2018
Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes
Découvrez nos stages sur cnrsformation.cnrs.fr
contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55
@CNRS_CFE

PHYSIQUE

COSMOS ET EXOPLANÈTES

Au cours du XXe siècle, la compréhension du Système solaire et du cosmos a connu une formidable accélération [illegible] relativité générale d'Einstein et la théorie du Big Bang, que technique, avec des télescopes toujours plus puissants qui scrutent les étoiles voisines du Système solaire et les confins du cosmos. Le prix Nobel de physique 2019 récompense des avancées liées à ces deux domaines. Une moitié du prix va à James Peebles, de l'université Princeton, dont les nombreux apports théoriques ont aidé à mieux saisir les processus à l'œuvre dans l'Univers primordial. L'autre moitié va à Michel Mayor et Didier Queloz, de l'université de Genève, qui ont découvert la première exoplanète en orbite autour d'une étoile comparable au Soleil. ■

S. B.

https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019

MEDECINE

MÉCANISME DE L'OXYGÉNATION

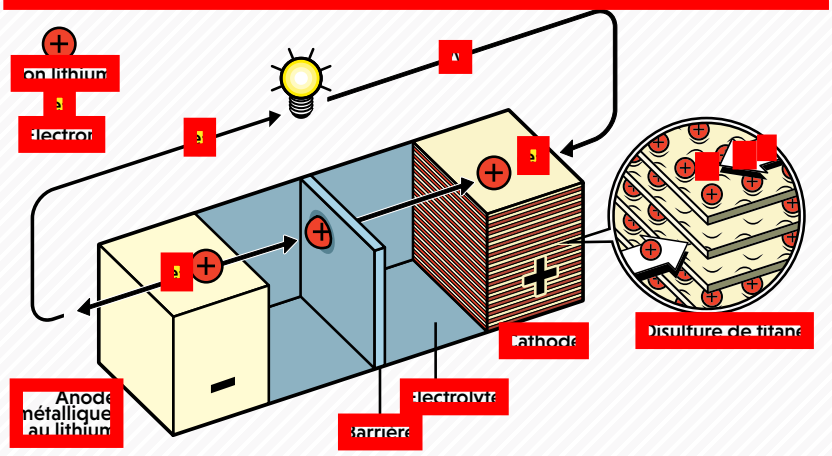
Si l'on sait depuis longtemps que l'oxygène joue un rôle clé dans le fonctionnement des cellules des animaux, le mécanisme [illegible] l'oxygène disponible dans l'environnement n'a été compris qu'à partir des années 1990, grâce aux travaux des trois lauréats du prix Nobel 2019 de physiologie ou médecine. L'érythropoïétine (EPO) est une hormone qui augmente le nombre de globules rouges dans le sang en réponse à une baisse d'oxygène (hypoxie), assurant ainsi une oxygénation correcte des organes. En 1995, l'équipe de Gregg Semenza, aujourd'hui à l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, a découvert un complexe protéique qui active la production d'EPO en cas d'hypoxie. William Kaelin, de l'université Harvard, aux États-Unis, Peter Ratcliffe, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, et leurs collègues ont complété l'explication du mécanisme à l'échelle moléculaire. ■

M.-N. C.

https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2019

CHIMIE

LA RÉVOLUTION DES BATTERIES AU LITHIUM



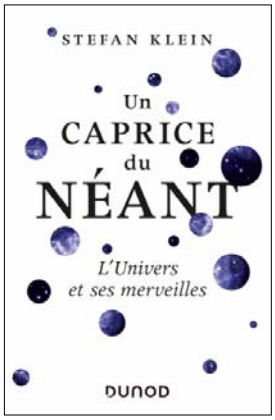
Les trois nobélisés de cette année ont contribué à concevoir la batterie rechargeable lithium-ion. Dans les premiers modèles *(comme ci-dessus)*, l'anode se détruisait progressivement en réagissant

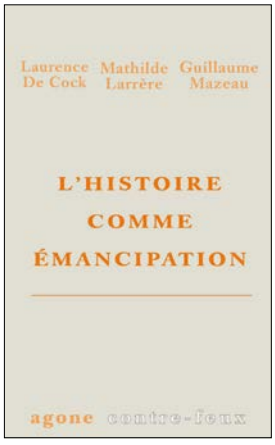
On oublie parfois l'importance d'inventions maintenant ancrées dans notre quotidien. Il en est ainsi des « batteries lithium-ion » des téléphones portables ou des voitures électriques. Le comité Nobel a distingué cette année trois chimistes pour leurs avancées majeures dans le développement de ces batteries. Tout a commencé dans les années 1970, lorsque de grands groupes industriels se sont intéressés à d'autres solutions que la voiture à essence. Le [illegible] une batterie rechargeable meilleure que celles au plomb, trop lourdes, ou au nickel-cadmium, peu performantes et d'une durée de vie limitée. Rappelons qu'une batterie est censée alimenter un appareil en courant électrique continu grâce à une circulation d'électrons entre ses deux électrodes. L'une, l'anode, doit fournir des électrons, et l'autre, la cathode, doit les capter. L'anode doit donc être constituée d'une espèce chimique ayant tendance à libérer des électrons. Stanley Whittingham a alors utilisé un métal très léger: le lithium. L'atome de lithium perd facilement un électron, et se transforme en un ion lithium chargé positivement. Le chercheur a opté pour une anode constituée d'un bloc de lithium pur solide. Pour la cathode, il a choisi le disulfure de titane (TiS_2), très conducteur et comportant des trous de la taille d'un atome, pouvant accueillir les ions lithium issus de la réaction sur l'anode. La batterie lithium-ion était née. Stanley Whittingham a ensuite amélioré sa batterie pour éviter la formation de cristaux de lithium, à l'origine de courts-circuits.

D'autres progrès majeurs ont suivi. Notamment, l'Américain John Goodenough, autre lauréat du Nobel, a remplacé le disulfure de titane constituant la cathode par du dioxyde de cobalt (CoO_2), capable de stocker beaucoup d'ions sans se fragiliser. La tension électrique délivrée a ainsi doublé. Mais ce système était encore dangereux et inflammable à cause du lithium solide. Le Japonais Akira Yoshino, troisième lauréat, a remplacé l'anode de lithium pur par du coke de pétrole, stable et capable de stocker des atomes de lithium. Utilisée depuis 1991, la batterie lithium-ion s'est imposée dans nombre d'appareils portables et dans les véhicules électriques. ■

LUCAS GIERCZAK

https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019





PHYSIQUE POÉTIQUE

UN CAPRICE DU NÉANT

Stefan Klein

Dunod, 2019

208 pages, 18,90 euros

L'auteur de cet essai associe lyrisme, physique et philosophie. Il ne fait bien l'époque s'y prête, du reste, étant donné les étranges découvertes du siècle passé.

L'astrophysique a joué un rôle essentiel dans ce phénomène: elle a prouvé, à la suite d'une découverte inattendue de 1964, que l'Univers avait eu un début, le Big Bang; mais, associée à la relativité générale d'Einstein, elle a ensuite montré que 85% de la masse de l'Univers devait être constituée d'une «matière noire» dont on ignore totalement la nature et que l'on cherche en vain à détecter depuis une trentaine d'années.

Autre exemple, l'importance de l'aléatoire dans notre Univers, où la quasi-nullité de la probabilité d'apparition de la vie est compensée par la quasi-infinité du nombre d'étoiles et de planètes (la première exoplanète a été découverte en 1989; on en est à près de 4000).

Aussi, à partir de 1925, la mécanique quantique avait élucidé la plupart des énigmes de l'atome, mais dès 1935 était apparue la question de la «non-localité» des particules élémentaires (leur possibilité de se «trouver» en deux endroits à la fois); cette propriété, considérée comme prouvée par Alain Aspect en 1982, a depuis conduit à une seconde révolution quantique, à la fois théorique et technique.

Les paradoxes du temps sont également évoqués: pourquoi y a-t-il un passé, un présent et un avenir, alors que tous les processus élémentaires de la nature sont réversibles? Selon Ludwig Boltzmann (1844-1906), cela viendrait de notre savoir et des probabilités; mais Roger Penrose a calculé en 1989 que notre Univers n'aurait alors eu pratiquement aucune chance d'apparaître. D'où des théories, auxquelles l'auteur ne semble pas accorder une totale confiance, selon lesquelles il y aurait un nombre gigantesque d'univers («multivers») dont au moins un, le nôtre, connaîtrait la vie et l'intelligence. Philosophique!

CHRISTOPHE PICHON
INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS

HISTOIRE ET SOCIÉTÉ

L'HISTOIRE COMME ÉMANCIPATION

Laurence De Cock, Mathilde Larrère et Guillaume Mazeau

Agone, 2019

144 pages, 12 euros

Les auteurs écrivent: «Le métier d'historien ne peut se limiter à la production de savoirs. Nous avons aussi le devoir de les partager.» Dans ce pamphlet revigorant, trois des historiens les plus actifs sur les médias et réseaux sociaux veulent alerter sur le danger que court, selon eux, notre démocratie. Les historiens doivent sortir de leurs laboratoires et vulgariser leurs travaux, afin de ne pas laisser le magistère de la parole à des amateurs, certes talentueux, mais qui véhiculent des clichés réactionnaires.

Nous ne sommes plus à l'époque de «nos ancêtres les Gaulois» et des belles images des plaquettes de chocolat Meunier. L'Histoire doit être émancipatrice, c'est-à-dire aider à comprendre le présent pour préparer le futur, tout en s'inspirant des expériences du passé. Et il ne s'agit plus seulement de l'histoire des élites, mais aussi de celle des classes sociales inférieures. On pensait autrefois que ces dernières n'ont laissé que peu de traces. C'est faux: les historiens courageux savent les retrouver et les faire parler.

Attention cependant «à ne pas substituer un roman de gauche à un roman de droite, ce qui n'aurait pas grand sens dans une perspective d'émancipation». Même si «on ne fait de l'histoire qu'à partir d'un point de vue», «la crédibilité de la démarche de l'historien engagé repose sur la transparence de l'administration de la preuve». Sans retomber dans les pièges du passé, où les chapelles d'historiens se renvoyaient à la figure tel ou tel épisode revisité de la Révolution, en se méfiant des simplifications qui nous renverraient à un «roman national» fantasmé, les historiens d'aujourd'hui doivent se montrer et expliquer. Libre ensuite à chacun de se faire son opinion, qu'il fasse partie des «dominants» ou des «dominés».

ROMAIN PIGEAUD
CREAAH, UNIVERSITÉ DE RENNES

SOCIOLOGIE

LES FONDEMENTS OUBLIÉS DE LA CULTURE

Dominique Guillo

Seuil, 2019
360 pages, 23 euros

Prolongeant les « études de genre », les études animalistes visent [illegible] **et cultures animales, éthologie et anthropologie. C'est dans ce courant** comportementaliste iconoclaste et en plein essor que se situe ce livre. Il vise à réconcilier sciences de la vie et de l'homme, lesquelles ont en quelque sorte divorcé lors du dialogue de sourds de la sociobiologie des décennies 1970 et 1980.

L'auteur, directeur de recherche au CNRS et professeur de sociologie à l'université de Rabat, avait publié à destination du grand public *Des Chiens et des Humains,* (Le Pommier, 2009). Le nouvel ouvrage est en quelque sorte le prolongement théorique du précédent. Il s'appuie sur la coévolution entre l'homme et son meilleur ami (le chien) pour proposer un programme de recherche visant à articuler les sciences sociales (c'est-à-dire humaines!) et celles de la vie.

Il est vrai que les recherches fondamentales sur l'éthologie des animaux domestiques ont été négligées, le chien étant jusqu'à récemment considéré comme sans intérêt scientifique puisque modifié par l'homme. Mais, aussi bien en phylogénie moléculaire qu'en paléoanthropologie ou en psychologie expérimentale, les découvertes se multiplient et prouvent qu'il s'agit, de loin, du plus ancien animal domestique et que les presque 400 races de chiens sont issues du seul groupe commun. À la pointe de cette réhabilitation, Dominique Guillo estime au contraire que les chiens de berger ou d'aveugle démontrent la profondeur et la réciprocité des échanges interspécifiques pour constituer une approche originale d'étude des comportements sociaux et culturels.

PIERRE JOUVENTIN
THOLOGUE ÉMÉRITE AU CNRS

EXOBIOLOGIE

À LA RECHERCHE D'INTELLIGENCES EXTRATERRESTRES

Florence Raulin Cerceau

Nouveau Monde, 2019
328 pages, 19,90 euros

Lorsqu'en été, nous observons le ciel, nous sommes subjugués [illegible] **viennent-elles? Existe-t-il une autre vie quelque part? Les philosophes se** sont intéressés à la question de la pluralité des mondes dès l'Antiquité. L'autrice nous raconte l'histoire de cette recherche de vies et d'intelligences extraterrestres.

Avec la révolution copernicienne, la Terre a cessé d'être le centre de l'Univers, étant reléguée au rang de simple planète. De ce fait, les hypothèses sur l'existence d'intelligences extraterrestres ont pris vigueur. Des scientifiques, des écrivains, des philosophes se sont penchés sur la question, notamment Huygens, Fontenelle, Flammarion. Quand les moyens de communication à grande distance se sont développés, puis quand l'ère spatiale est arrivée, les recherches ont pu réellement prendre corps. Les projets se sont regroupés en une organisation internationale, le *Seti* (acronyme anglais de *Search for extraterrestrial intelligence*). De grands observatoires s'y sont impliqués, comme celui d'Arecibo, sur l'île de Porto Rico, ou celui de Nançay, en France.

Cette recherche pose de nombreuses questions: quelles sont les conditions de développement de la vie? La vie ailleurs est-elle la même? Etc. Florence Raulin Cerceau est astronome ainsi qu'historienne de l'exobiologie. Elle a écrit son livre en collaboration avec Dodji Cyrille Olou, qui apporte son point de vue au début et à la fin de l'ouvrage. Il pose de multiples questions, notamment sur la place des humains dans l'Univers si l'on devait y découvrir des intelligences extraterrestres. Cette association complète bien l'ouvrage, qui est accessible à tous et passionnant.

JEAN COUSTEIX
SAE, SUPAÉRO, TOULOUSE

ET AUSSI

ANATOMIE COMPAREE DES ESPÈCES IMAGINAIRES

Jean-Sébastien Steyer

Le Cavalier Bleu, 2019
136 pages, 18 euros

Pour créer en science, il peut être bon de se libérer… de la science. C'est ce que fait Jean-Sébastien Steyer, spécialiste du monde du Permien et des mondes imaginaires. Il analyse ici avec sa sensibilité de chercheur de l'évolution… Hulk, les « derniers Porgs », le Marsupilami et d'autres créatures de fiction. Depuis que le Premier ministre britannique a comparé son pays à Hulk, il importe de tout savoir sur les caractéristiques d'êtres qui n'existent pas en chair et en os, mais qui sont de plus en plus présents dans notre culture.

QUAND LA TERRE TREMBLE

Christiane Grappin et Éric Humler (dir.)

CNRS Editions, 2019
264 pages, 24 euros

Quels services nous protègent en cas de séisme majeur en France ? Pour répondre, les auteurs de cet ouvrage collectif passent en revue les risques sismiques qu'encourt la France ; puis ils font de même s'agissant des volcans, et nous apprenons que les seuls qui nous menacent sont aux Antilles et à la Réunion. Ils décrivent ensuite la « chaîne du risque », c'est-à-dire la façon dont les fonctions de surveillance s'organisent en France, avant de discuter de quelle façon les « gestionnaires de risque » entrent en jeu en cas de crise. Joliment illustré, l'ouvrage se termine par des recommandations.

DANS LA TÊTE D'UN CHIEN

Gregory Berns

Humensciences, 2019
336 pages, 24 euros

L'auteur raconte le grand projet d'étude au scanner des états mentaux des chiens et des otaries, qu'il a lancé et mené selon un protocole n'impliquant pour les animaux ni douleur ni contrainte. Son récit est rempli d'anecdotes et renseigne à merveille sur les difficultés pratiques d'une telle entreprise. Il présente aussi les résultats de celle-ci. Par exemple qu'une zone du lobe temporal canin sert à la reconnaissance des visages ; ou encore que les chiens, même s'ils reconnaissent les mots, n'ont pas le centre de traitement du langage.

PARIS

JUSQU'AU 19 JANVIER 2020
Institut du monde arabe
www.imarabe.org

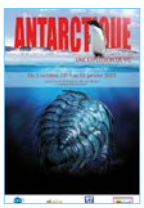
AlUla, merveille d'Arabie

Située dans le nord-ouest de l'Arabie saoudite, la région d'AlUla constitue un site archéologique majeur, étudié depuis une [illegible] ci pour la première fois au grand public. Cette vallée fertile de la péninsule Arabique est habitée depuis 7000 ans. Sociétés néolithiques, royaumes de Dadan et Lihyân entre le VIIIe et le IIe siècle avant notre ère, Nabatéens qui fondent la ville de Hégra, Romains, sociétés préislamiques puis islamiques y ont laissé de nombreux vestiges bien conservés, dont une centaine de monumentaux tombeaux rupestres à façade décorée construits par les Nabatéens. Les visiteurs feront connaissance avec le magnifique site naturel et son vaste patrimoine archéologique par le biais de pièces et objets archéologiques rares, de dispositifs numériques, de photographies et de vidéos inédites signées Yann Arthus-Bertrand... ■

PRADES-LE-LEZ (HÉRAULT)

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020
Maison départementale de l'environnement
www.herault.fr, tél. 04 67 67 82 20

Antarctique, une explosion de vie



Dans un décor rappelant celui de la base scientifique Dumont d'Urville, en Terre Adélie, des objets, jeux, témoignages, dispositifs multimédia et expériences invitent à partir dans les pas d'une équipe de biologistes en mission. Pour partager un peu leur quotidien et découvrir la faune très riche qui vit sur ou sous les glaces du sixième continent. ■

TOULON (VAR)

JUSQU'AU 9 FÉVRIER 2020
Muséum départemental du Var
museum.var.fr, www.facebook.com/MDN4freres

Jules Verne : des abysses aux étoiles

Cette exposition également présentée non loin de Toulon, au Beausset (www.facebook.com/MDN4freres), propose à ses visiteurs de plonger dans l'univers imaginaire du célèbre auteur des «Voyages extraordinaires». Les abysses et les océans sont en vedette à Toulon, tandis que l'astronomie et le Système solaire le sont au Beausset. ■

ET AUSSI

Mardi 5 novembre, 18 h
Le Lieu unique, Nantes
www.lelieuunique.com
LA COMPÉTITION MONDIALE EN IA
Charles Thibout, chercheur à l'Iris, discute des ambitions internationales et antagonismes suscités par les perspectives économiques ou militaires du développement de l'intelligence artificielle.

Les 8 et 9 novembre
Université de Tours, site Tanneurs
https://bit.ly/35i3vZx
ALIMENTATION, GOÛT ET SANTÉ
Une première édition de *déTours des sciences* avec quatre demi-journées de conférences et débats sur les grands défis de l'alimentation, les questions de santé, les peurs et plaisirs alimentaires, et la table du futur.

Mardi 12 novembre, 17 h
Acad. des sciences, Paris
https://bit.ly/33czKaL
MÉCANIQUE QUANTIQUE
De l'étrangeté quantique aux technologies de pointe : une présentation par le physicien et académicien Alain Aspect.

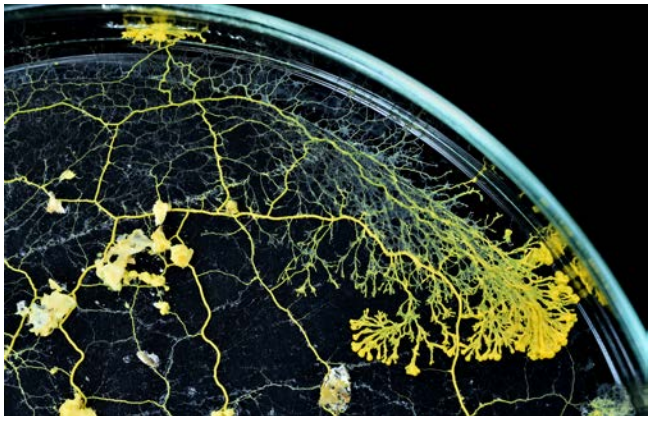
Du 14 au 19 novembre
Paris et sa région
https://bit.ly/2Nk0Bye
PENSER L'INCROYABLE
Tel est le thème de cette 4e édition du *Festival des idées Paris*, qui décline les questions très variées (*fake news*, supercheries scientifiques, magie, vie extraterrestre, etc.) à travers conférences, spectacles, jeux-débats, expositions et ateliers.

Du 21 au 23 novembre
Cité des sciences et de l'industrie, Paris
http://timeworld2019.com
TIME WORLD
Conférences, tables rondes, ateliers éducatifs, spectacles et espaces d'exposition attendent le grand public, les industriels et les chercheurs pour décliner le temps à toutes les sauces ou presque (en français !).

PARIS

À PARTIR DU 19 OCTOBRE 2019
Parc zoologique de Paris
www.parczoologiquedeparis.fr

Le blob, nouvelle espèce au zoo



Le blob, sobriquet pour *Physarum polycephalum*, est un organisme insolite de la classe non moins bizarre des myxomycètes. Informe, il n'est constitué que d'une seule cellule [illegible] ni un végétal, ni un champignon; il présente 720 sexes différents; et des études récentes ont révélé qu'il manifeste des comportements «intelligents». Le Parc zoologique de Paris a eu la bonne idée d'accueillir et d'exhiber (une première mondiale pour un zoo), dans une «blob-zone» spécialement aménagée, cet être qui défie les catégories habituelles du vivant. ■

GENÈVE

JUSQU'AU 19 JANVIER 2020
Muséum de Genève
www.museum-geneve.ch

Afrique, 300 000 ans d'humains

Tous les humains actuels descendent de populations ayant vécu pendant 200 000 ans en Afrique, avant d'essaimer au cours des 100 000 dernières années. C'est, parmi bien d'autres choses, ce que rappelle cette exposition consacrée à l'histoire d'*Homo sapiens* et à la place de l'Afrique dans celle-ci. L'installation *Humanæ* de la Brésilienne Angélica Dass, avec ses milliers de portraits qui révèlent un aspect de l'infinie diversité humaine, complète l'exposition. ■

BEAUVAIS ET HAUTS-DE-FRANCE

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020
Lieux divers à Beauvais et dans sa région
www.photaumnales.fr

Le temps de l'Anthropocène

Le festival de photographie «Les Photaumnales» a choisi de consacrer sa 16e édition à la relation qu'entretiennent [illegible] versé et menacé par les activités anthropiques. Des œuvres de près d'une cinquantaine de photographes sont exposées et témoignent de la diversité des regards que les artistes peuvent porter sur la planète. Un échantillon? Par leur composition et l'éclairage utilisé, les photos de jungles que propose Olivia Lavergne (*voir la photo ci-dessus*) semblent montrer une nature factice, celle de jardins tropicaux ou de décors pour films d'aventure; l'Allemande Ursula Böhmer cherche à confronter les regards des humains et des animaux avec ses portraits de vaches de races anciennes; les clichés de l'Américain Chris Jordan illustrent les méfaits de la pollution par les plastiques en montrant des bébés albatros morts, l'estomac rempli d'emballages et de jouets; ceux de Mathias Depardon documentent le déclin des marais d'Irak... ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 2 novembre
Marchiennes (Nord)
Tél. 03 27 71 37 58
https://bit.ly/312QPCq

LA VIE D'UNE TOURBIÈRE

Deux heures de découverte de la Grande tourbière de Marchiennes et la diversité de sa faune et flore.

Samedi 2 novembre, 8 h
La Gineste,
entre Marseille et Cassis
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org

MIGRATIONS À LA GINESTE

Depuis le sommet d'une colline, une matinée d'observations du passage des oiseaux migrateurs.

Samedi 2 novembre, 14 h
Wegscheid (Haut-Rhin)
Tél. 06 47 29 16 20
www.geologie-alsace.fr

MINES D'ARGENT

Une petite après-midi à la découverte du secteur minier le plus important de la vallée de la Doller, exploité dès le Moyen Âge et en cours de fouilles et de valorisation.

Vendredis 8 et 22 novembre
Saint-Avé (Morbihan)
Tél. 06 43 61 68 31

OBSERVER LES ARBRES

Aurélie Dethy, herboriste, propose une sortie pour apprendre à observer les arbres et à les utiliser en cuisine et en herboristerie.

Dimanche 10 novembre
Bois-le-Roi (77)
Tél. 01 64 22 61 17
www.anvl.fr

LA MARE AUX ÉVÉES

Une journée d'excursion autour de cette mare artificielle pour en saisir la géologie, l'hydrogéologie et l'histoire.

Samedi 30 novembre
Verniolle (Ariège)
Tél. 09 67 03 84 07
www.natureo.org

LE DORTOIR DU MILAN ROYAL

L'hiver, ce rapace apprécie de passer la nuit en compagnie de ses congénères. Ces rassemblements facilitent l'observation et le comptage des individus.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LE MONDE EST MINIATURISABLE

Les capacités modernes de stockage de l'information offrent une solution pour conserver dans un petit volume une trace de langues et de patrimoines en cours d'extinction

Il est difficile de recenser précisément le nombre de langues vivantes dans le monde. Il y en aurait entre 3 000 et 7 000.

D'après l'Unesco, il y a dans le monde quelque 2500 langues en danger – le kuuk-thaayorre, en Australie, par exemple, n'aurait plus que quelques dizaines de locuteurs. Dès lors, les lin- [illegible] ne disparaissent complètement, pour en garder une trace, même si nous ne les utilisons plus. Mais pour préserver ainsi un maximum de langues, il faut que la sauvegarde de chacune coûte le moins possible. Or publier un corpus de textes en aïnou, un dictionnaire du beba ou une grammaire du danezaa coûte cher, et diffuser des disques ou des bandes magnétiques, plus encore. En outre, même quand un dictionnaire est publié et conservé dans quelques bibliothèques universitaires, il reste difficilement accessible, même aux spécialistes, et, la recherche progressant, il devient vite obsolète.

C'est pourquoi ces linguistes publient désormais, le plus souvent, ces documents en ligne, afin qu'ils soient moins chers, plus accessibles, plus évolutifs, plus coopératifs et multimodaux. C'est un exemple de la manière dont l'informatique transforme les humanités, en modifiant la façon dont on conserve les données sur lesquelles les chercheurs travaillent.

Cet exemple des langues en danger nous montre comment le développement de l'informatique change notre rapport à la mémoire et à l'histoire. À chaque instant, un nouvel état de l'Univers efface le précédent et nous met devant le dilemme de conserver l'état ancien ou de le laisser disparaître. Ainsi, nous devons décider de conserver nos vieux bâtiments, condamnant nos villes à l'immobilité, ou de les détruire pour en construire de nouveaux, laissant progressivement s'effacer le souvenir de ce qu'elles ont été. En archivant des textes, des images fixes ou animées et des sons, l'informatique nous permet de résoudre partiellement ce dilemme : elle laisse advenir un monde nouveau tout en conservant, pour un temps au moins, une copie d'une partie du monde ancien.

> **Dans le monde, quelque 2500 langues sont menacées de disparition**

Pour ce faire, l'informatique exploite une propriété surprenante : le monde est prodigieusement miniaturisable. En effet, la physique théorique nous apprend que stocker un bit d'information ne nécessite, en principe, qu'une surface de $7{,}2\times10^{-70}$ mètre carré (ce qu'on nomme l'« aire de Bekenstein » et qui vaut $4\ln(2)$ multiplié par l'aire de Planck). Il est donc possible de sauvegarder sur l'aire d'une page de Pour la Science 8×10^{67} bits, soit 3×10^{63} chroniques comme celle-ci. Même si, en pratique, nous sommes très loin d'une telle performance, nous pouvons déjà conserver des bibliothèques entières dans un dé à coudre, par exemple une bibliothèque de 1 million de volumes sur un disque de 1 téraoctet, qui mesure une dizaine de centimètres et coûte 50 euros.

Cela ouvre des perspectives totalement nouvelles pour la préservation du patrimoine : nous ne connaissons l'Égypte ancienne que par ses temples et ses tombes, mais, si nous le voulons, dans cinq mille ans, nos descendants pourront avoir accès à nos pages web, nos recettes de cuisine, voire nos horaires de trains. Et ils s'étonneront peut-être que, des premiers millénaires de son histoire, l'humanité ait conservé si peu de choses.

Le développement des ordinateurs et des réseaux, en favorisant quelques langues très utilisées, est sans doute responsable – à côté d'autres facteurs tels que la colonisation ou l'urbanisation – de la fragilisation de nombreuses langues en danger. Mais il nous donne aussi des outils pour les conserver, ce que nous n'avons pas pu faire avec des dizaines de milliers de langues qui, par le passé, sont nées puis ont disparu, sans laisser la moindre trace. ■

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

pourlascience.com/EMS

espions
exposition
15 octobre 2019
— 9 août 2020
cité
sciences
et industrie
en coproduction avec
LE BUREAU DES LÉGENDES
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
MINISTÈRE DE LA CULTURE
RESERVATION RECOMMANDÉE
cite-sciences.fr
#ExpoEspions
M > Porte de la Villette
TOE The Oligarchs Editions
DRM
DNRED
Tracfin
cea
CANAL+
C NEWS
Le Point
SCIENCE
Qwant
Europe 1

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LA PMA, REMÈDE À L'INFERTILITÉ SOCIALE

En s'ouvrant aux couples de femmes et aux femmes célibataires, la procréation médicalement assistée subit une mutation qui pose des défis d'ordre social.

La psychanalyste et essayiste Monette Vacquin a résumé dans une formule grinçante la complexité, dans nos sociétés, des liens entre sexualité, reproduction et filiation: «On est passé de la question "Comment faire [illegible] années 1970, à "Comment faire des enfants sans faire l'amour?", dix ans plus tard, puis aujourd'hui, à "Comment faire des enfants en étant du même sexe?"» (*La Croix*, 22 juin 2019).

L'élargissement progressif du périmètre de l'usage des techniques de procréation médicalement assistée (PMA) témoigne du déplacement de ces lignes bioéthiques. C'est aussi un excellent modèle pour analyser la façon dont la confiance sociale a été éprouvée et ses enjeux actuels.

On peut décliner la confiance en trois composantes dont le sens est plus facilement saisi par la langue anglaise. *Trust* est la confiance interpersonnelle dans le comportement coopératif d'autrui face à des situations nouvelles. *Confidence* est la croyance dans le bon fonctionnement de nos structures sociales. La préservation de ces deux dimensions constitue un défi dans les innovations institutionnelles.

Les Centres d'étude et de conservation des œufs et du sperme humain (Cecos), mis en place en 1973 pour aider les couples infertiles à avoir un enfant grâce à un don de gamètes, ont su y répondre. Le *trust* a découlé de l'accompagnement individualisé des patients, tandis que la *confidence* a résulté de règles régissant le don du sperme élaborées sur le modèle de celles du don de sang (secret du donneur, volontariat, non-profit...).

> **L'accomplissement du désir féminin d'enfant change la destinée de la PMA**

On peut traduire *accountability*, le troisième volet de la confiance, par «l'obligation d'avoir à répondre de ses actes». Le travail juridique autour des techniques de procréation engage la responsabilité de l'État sur cette nécessité de rendre des comptes. Elle a démarré avec la naissance d'Amandine en 1982, le premier bébé conçu par fécondation *in vitro*, et elle a débouché sur l'inscription des PMA à destination des couples hétérosexuels stériles dans les premières lois dites «de bioéthique» en 1994.

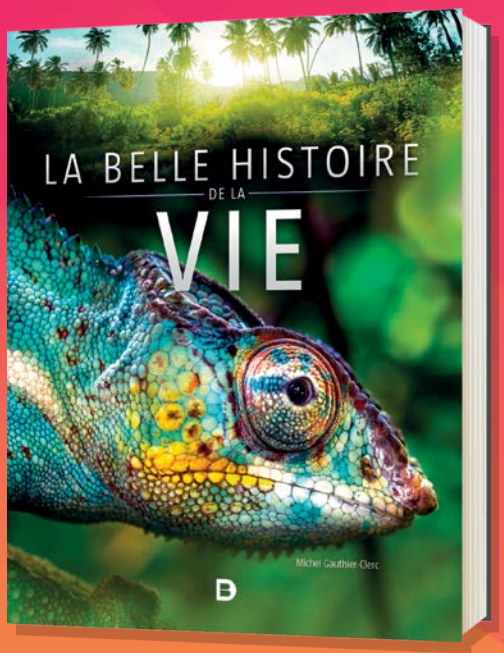
Au début, ces techniques visaient à pallier l'infertilité pathologique. Or le dernier projet de loi relatif à la bioéthique présenté à l'Assemblée nationale ouvre la PMA aux couples de femmes et aux femmes seules. L'affirmation de nouveaux systèmes de parenté amène ainsi à requalifier la PMA, qui était à visée thérapeutique, en technique destinée à réaliser un désir féminin d'enfant. Ce faisant, l'infertilité à combattre est passée de biologique à sociale.

Mais avec cette transformation où la filiation devient fondée sur la volonté et le comportement parental plutôt que sur le lien biologique, la confiance sociale est à reconquérir – car la possibilité juridique donnée aux femmes de ne plus être soumises à la fatalité biologique inscrit un désir privé dans l'intérêt général.

Dès lors, les gouvernants devront s'assurer que les professionnels de santé ne deviennent pas de simples prestataires de service (*trust*) et que les organisations dédiées à la PMA respectent les valeurs du service public face à un marché de la filiation (*confidence*). Par ailleurs, l'accomplissement du désir féminin d'enfant change la destinée de la PMA et, avec elle, celle de la société. Avec une relation médicale qui n'est plus fondée sur une pathologie, et un droit à la procréation sans sexe accordé à un segment particulier de la population, il faut s'attendre à un défi politique difficile à relever: au regard de la diversité des modèles familiaux, les gouvernants devront justifier pourquoi cette procréation sans sexe n'est pas applicable à tous (*accountability*). ■

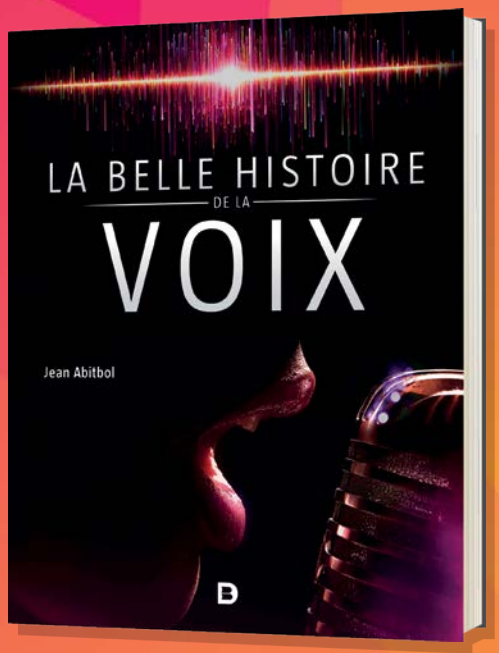
VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche au CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris

Beaux et intelligents !



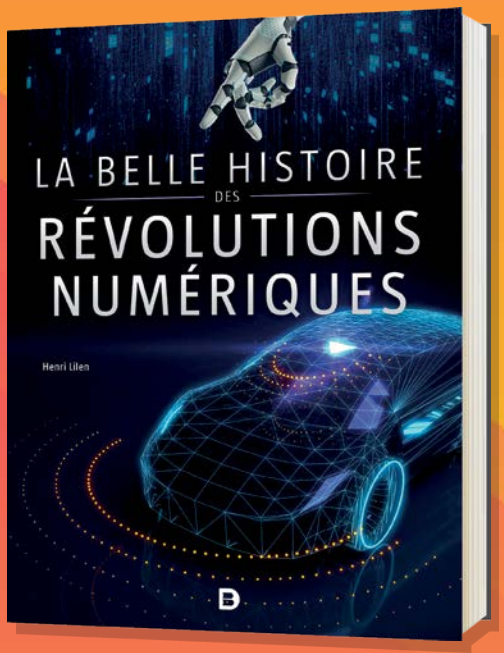
Une enquête passionnante au cœur du vivant !

384 p. • plus de 200 ill.
re éd. • 2019 • 9782807321779
29 €



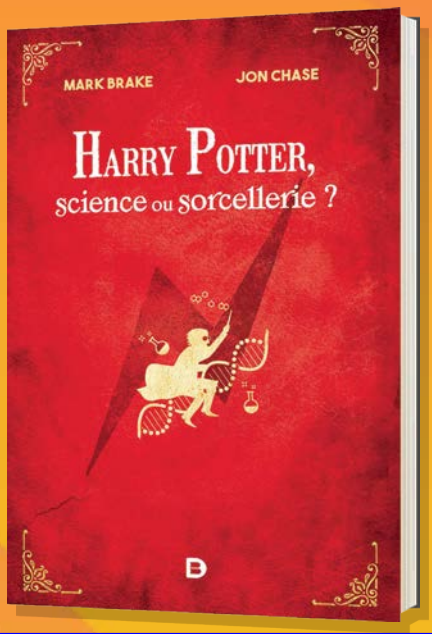
Jean Abitbol raconte la voix : entre science, art et émotion

304 p. • plus de 150 ill.
re éd. • 2019 • 97823532744420
29 €



De l'électronique aux défis de l'intelligence artificielle

384 p. • plus de 200 ill.
re éd • 2019 • 9782807324787
29 €



L'univers incroyable et magique d'Harry Potter redécouvert sous le prisme de la science

296 p. • 1re éd • 2019
9782807324718 • 16 €

En librairie ou sur www.deboecksuperieur.com

deboeck SUPÉRIEUR

L'ESSENTIEL

- En général, les traitements contre le cancer se concentrent sur les mutations malignes et administrent de fortes doses de médicaments toxiques visant à éradiquer la maladie.
- Mais vu sous le prisme de la théorie de l'évolution, le cancer apparaît sous un tout autre angle : ce ne sont pas tant
- es mutations dans les cellules qui accélèrent sa croissance que l'environnement les cellules mutées.
- Testée chez l'animal et chez des hommes atteints d'un cancer avancé de la prostate, une thérapie fondée sur cette idée obtient des résultats encourageants.

LES AUTEURS

JAMES DEGREGORI
professeur de biologie moléculaire au campus médical Anschutz de l'université du Colorado à Denver

ROBERT GATENBY
médecin et directeur du département de radiologie du Moffitt Cancer Center à Tampa, en Floride

La théorie de l'évolution, nouvelle arme contre le cancer

Comme tout système vivant, le cancer est soumis aux lois de la sélection naturelle. S'appuyant sur cette idée, de nouvelles stratégies contre cette maladie visent non pas à l'éradiquer à tout prix, mais à la maintenir sous contrôle.

Cette année, aux États-Unis, au moins 31 000 hommes apprendront qu'ils ont un cancer de la prostate ayant atteint d'autres parties du corps, comme les os et les ganglions lymphatiques. La plupart recevront les soins d'oncologues hautement qualifiés et expérimentés, ayant accès à 32 médicaments approuvés pour traiter cette maladie. Pourtant, plus des trois quarts succomberont à la maladie. Les cancers qui se propagent, dits métastatiques, sont souvent incurables. Les raisons pour lesquelles des patients en meurent malgré un traitement de pointe sont nombreuses. Néanmoins, elles sont toutes liées à une idée que Charles Darwin a popularisée en 1859 pour expliquer l'apparition et la disparition d'espèces d'oiseaux et de tortues. Aujourd'hui, nous l'appelons « évolution ».

Les cellules cancéreuses ressemblent aux pinsons que Darwin avait observés aux Galápagos, dont le bec variait légèrement d'une île à l'autre. Les pinsons mangent des graines, et les graines de chaque île avaient des formes différentes ou d'autres spécificités. L'oiseau dont la forme du bec correspondait le mieux à la graine locale avait accès à plus de nourriture et a eu plus de descendants, qui avaient aussi cette forme particulière de bec. Les oiseaux avec des becs moins adaptés, eux, n'ont pas survécu. Cette sélection naturelle a permis à différentes espèces de pinsons, avec des becs variés, d'évoluer sur chaque île. En d'autres termes, lorsque deux groupes d'organismes sont en compétition dans le même petit espace, celui le mieux adapté à l'environnement l'emporte.

Les cellules cancéreuses évoluent de manière similaire. Dans les tissus normaux, les cellules non cancéreuses se développent, car elles sont bien adaptées aux signaux biochimiques de croissance, aux éléments nutritifs et aux signaux physiques qu'elles reçoivent des tissus sains environnants. Si une mutation crée

une cellule cancéreuse mal adaptée à son environnement, les chances de cette dernière sont faibles au départ : les cellules normales la surpassent dans la compétition pour les ressources. Mais si le vieillissement ou une inflammation – parfois due à un cancer en croissance – endommagent l'environnement, la cellule cancéreuse s'en sort mieux et commence à surpasser les cellules normales qui l'occupaient. C'est le changement de l'environnement qui détermine le succès des cellules cancéreuses.

Nous avons nommé « oncogenèse adaptative » cette théorie et, à l'appui, avons montré chez des animaux de laboratoire qu'en modifiant l'environnement cellulaire d'un cancer, on entraîne son explosion, sans avoir rien changé aux cellules cancéreuses elles-mêmes. Les médecins ont également observé cette accélération de croissance du cancer chez des patients présentant des pathologies qui perturbaient les tissus, comme les maladies inflammatoires de l'intestin. L'idée est que l'on comprend mieux le cancer en s'intéressant à son environnement plutôt qu'en se concentrant uniquement sur les mutations à l'intérieur d'une cellule. En réduisant les altérations tissulaires causées par des processus tels que l'inflammation, nous pouvons restaurer un environnement plus normal et – comme nous l'avons montré dans des études sur des animaux – empêcher le cancer de prendre le dessus.

Notre perspective évolutionniste a également inspiré une approche thérapeutique différente du cancer, que nous avons testée avec succès lors de petits essais cliniques. Contre un cancer, les médecins utilisent la chimiothérapie à haute dose dans l'espoir de supprimer toute trace de menace et, au début, cela semble fonctionner. La tumeur diminue ou disparaît. Mais ensuite, elle revient et résiste aux médicaments qui avaient permis de tuer ses cellules, comme les bactéries qui développent une résistance aux antibiotiques. Lors d'un essai clinique auprès de patients atteints d'un cancer de la prostate, l'un de nous (Robert Gatenby) a essayé une alternative à l'approche de la terre brûlée, en utilisant la chimiothérapie à une dose juste suffisante pour maintenir la tumeur minuscule, sans la tuer entièrement.

Les résultats de nos stratégies de prévention et de traitement suggèrent qu'il est possible de contrer le cancer avant qu'il ne devienne un danger pour la vie et les organes, et de sauver de nombreux patients chez qui un traitement lourd a échoué.

UNE QUESTION D'ENVIRONNEMENT

Demandez à n'importe quel médecin ou chercheur sur le cancer : « Pourquoi le vieillissement, le tabagisme ou l'exposition aux rayonnements augmentent-ils les risques de cancer ? » Vous obtiendrez probablement une réponse courte : « Ces facteurs causent des mutations. » C'est en partie vrai. L'exposition à la fumée de cigarette ou aux rayonnements provoque des mutations dans notre ADN, lesquelles s'accumulent dans nos cellules tout au long de la vie. Ces mutations fournissent parfois aux cellules de nouvelles propriétés, comme des signaux hyperactifs de croissance favorisant les divisions cellulaires, un taux de mortalité réduit ou même une capacité accrue à envahir les tissus environnants.

Cependant, cette explication simple, axée sur les changements au sein des cellules, néglige le fait qu'un des principaux moteurs du changement évolutif dans une cellule unique – ou dans un ensemble de cellules, comme le corps humain – se trouve à l'extérieur, dans l'environnement de la cellule.

On sait que les perturbations de l'environnement ont fortement influencé l'évolution des espèces sur la Terre, notamment des modifications importantes des masses continentales, des gaz présents dans l'air et dans l'eau, et de la température ambiante. Ces changements ont conduit à la sélection de nouvelles caractéristiques adaptatives chez les organismes, produisant une diversité incroyable. Comme Darwin l'a écrit en 1859 dans *L'Origine des espèces*, « c'est grâce à cette lutte que les variations, si minimes qu'elles soient d'ailleurs, et quelle qu'en soit la cause déterminante, tendent à assurer la conservation des individus qui les présentent, et les transmettent à leurs descendants, pour peu qu'elles soient à quelque degré utiles et avantageuses à ces membres de l'espèce, dans leurs rapports si complexes avec les autres êtres organisés, et les conditions physiques dans lesquelles ils se trouvent ». En d'autres termes, Darwin proposait que la compétition pour des ressources limitées conduise à la sélection d'individus aux traits mieux adaptés à l'environnement. Et que lorsque l'environnement change, ces pressions évoluent et

C'est le changement de l'environnement qui détermine le succès des cellules cancéreuses

50 000

En France, le cancer de la prostate est le plus fréquent des cancers, avec plus de 50 000 nouveaux cas par an. Dès le diagnostic, environ 10 à 15 % des patients apprennent que leur cancer a produit des métastases, principalement osseuses et lymphatiques. Selon la dernière étude de Santé Publique France, 8 115 hommes en sont morts en 2018.

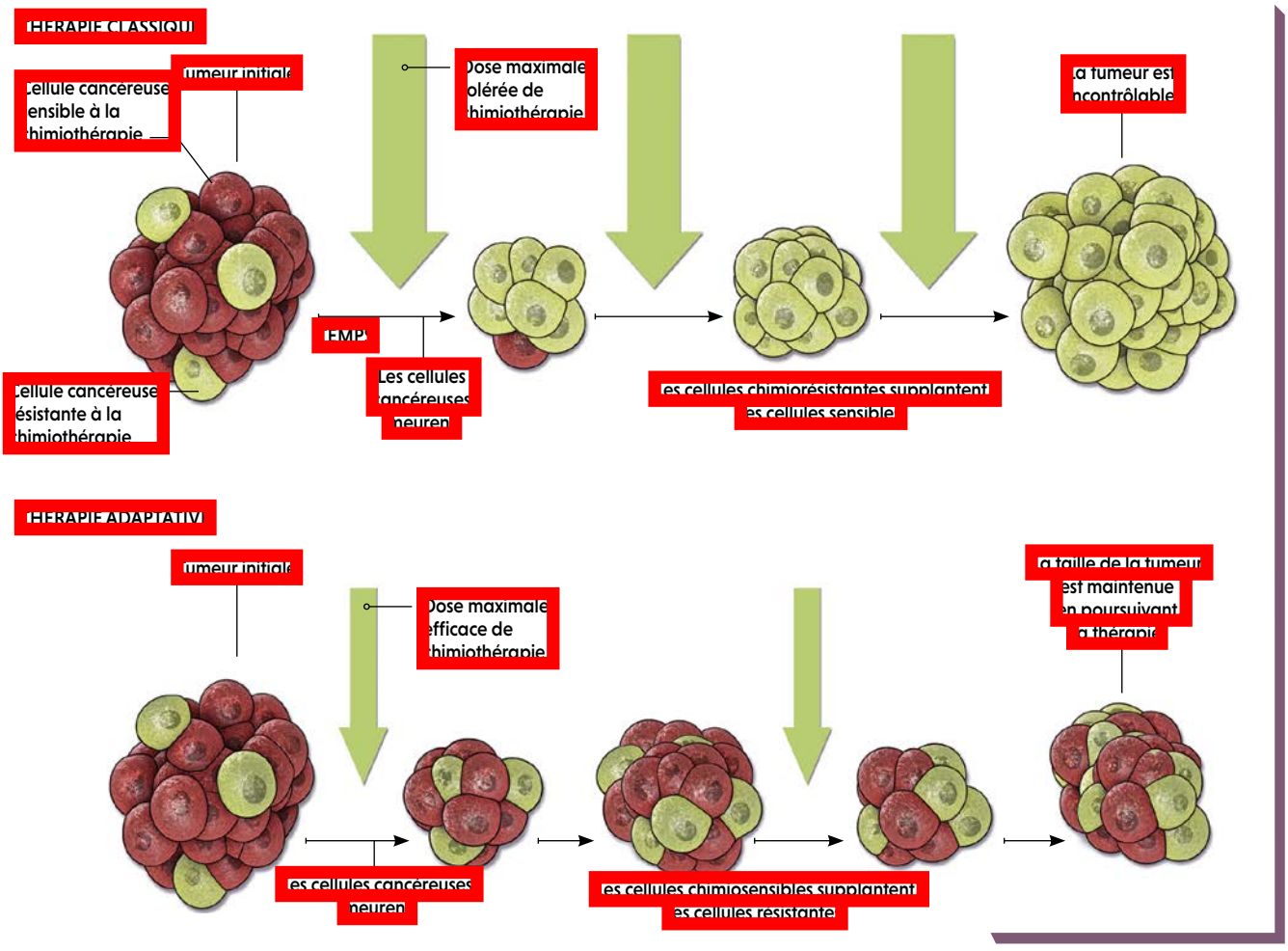
sélectionnent de nouveaux traits mieux adap-
tés au nouvel environnement.

Une dynamique darwinienne similaire s'ap-
pliquerait à l'évolution des cancers dans notre
corps. L'évolution et l'écologie nous ont toujours
fascinés, même si nous sommes biologiste molé-
culaire (James DeGregori) et médecin (Robert
Gatenby) de formation. Nos nombreuses lec-
tures dans ces domaines, bien que motivées ini-
tialement par une curiosité sans rapport avec nos
spécialités, ont révélé des parallèles surprenants
entre les forces motrices de l'évolution et nos
observations du développement du cancer et des
réactions des patients au traitement.

Par exemple, les cancérologues pensaient
qu'une mutation causant le cancer conférerait
toujours un avantage à la cellule qui l'a acquise,
mais nous y avons plutôt vu un principe évolu-
tif classique à l'œuvre : une mutation n'a pas
automatiquement pour effet d'aider ou de
désavantager un organisme. Au contraire, ses
effets dépendent des caractéristiques de l'envi-
ronnement local. Chez les pinsons de Darwin,
il n'y a pas de « meilleure » forme de bec en soi,
mais certains becs améliorent la survie dans
certaines conditions. De même, nous avons
estimé qu'une mutation qui active un gène can-
cérogène ne confère pas d'avantage inhérent à >

CONTRÔLER LE CANCER

En général, les oncologues traitent les cancers agressifs avec la « dose maximale tolérée » de médicaments – la plus grande quantité qu'un patient peut supporter. Les médicaments anticancéreux affectant aussi les cellules saines, leurs effets sur l'organisme constituent la seule limite réelle du traitement. Mais d'un point de vue évolutif, cette stratégie de la terre brûlée est l'une des raisons pour lesquelles les tumeurs resurgissent et tuent les patients. Les cellules cancéreuses qui survivent à l'assaut initial ont des traits qui leur permettent de résister au médicament et elles se développent facilement dans les tissus ravagés. Une autre approche, la « thérapie adaptative », vise à utiliser des doses plus faibles qui empêchent la tumeur de développer une résistance totale. Des tests effectués chez des patients atteints d'un cancer de la prostate montrent que le premier assaut réduit la tumeur, mais permet à quelques cellules cancéreuses sensibles au médicament de survivre. Celles-ci empêchent les cellules rivales résistantes de prendre le contrôle de la tumeur. La tumeur contenant toujours des cellules sensibles, un deuxième assaut réduit la taille, de même que les assauts suivants.



la cellule et peut être désavantageuse si elle rend cette cellule moins apte à utiliser les ressources du tissu environnant.

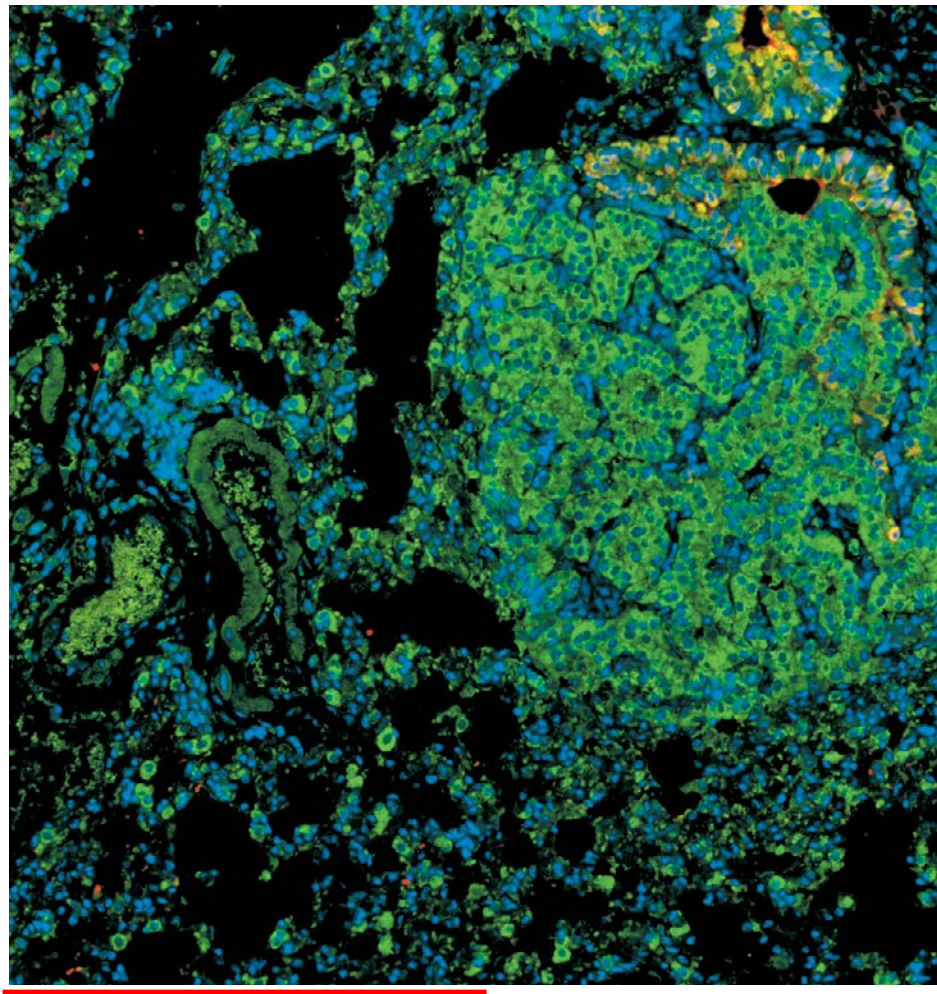
Nous nous sommes également inspirés de la théorie des équilibres ponctués, de Niles Eldredge et Stephen Jay Gould. Au début des années 1970, les deux paléontologues avaient remarqué que les espèces conservaient souvent des traits stables pendant des millions d'années, selon les archives fossiles, avant d'évoluer rapidement en réponse à un changement environnemental spectaculaire. Ce concept a nourri nos réflexions : et si certains tissus étaient initialement défavorables aux mutations cellulaires, mais subissaient des modifications (lésions, inflammation des poumons d'un fumeur…) qui stimulaient des changements évolutifs, conduisant parfois à un cancer ?

L'IMPACT DE L'AGE

Nous avons vu cette dynamique à l'œuvre pour la première fois en 2010, dans la moelle osseuse de souris, où nous avons montré que des modifications associées au vieillissement conduisaient au développement de leucémies. Dans le laboratoire de l'un de nous (James DeGregori), à l'université du Colorado à Denver, Curtis Henry, maintenant à l'université Emory, et Andriy Marusyk, aujourd'hui au Moffitt Cancer Center, ont produit les mêmes mutations cancérogènes dans quelques cellules souches de la moelle osseuse de souris jeunes et âgées. Les résultats ont montré que, selon l'âge, les mêmes mutations cancérogènes ont des effets très différents sur le destin de ces cellules : ces changements ont favorisé la prolifération de cellules mutées chez les souris âgées, mais pas chez les plus jeunes. De plus, le facteur déterminant ne semblait pas être dans les cellules mutées, mais dans le métabolisme et l'activité des gènes des cellules normales qui les entouraient.

Par exemple, chez les souris âgées, l'activité de gènes importants pour la division cellulaire et la croissance était réduite dans les cellules souches de la moelle osseuse, par rapport à celles des souris jeunes. Mais lorsque nous avons introduit, dans la moelle osseuse des souris âgées, les cellules souches portant la mutation cancérogène, l'activité des gènes a été restaurée. Pour autant, la mutation n'a pas eu d'effet bénéfique sur les souris : les cellules mutées ont été sélectionnées, sans doute à cause du regain d'activité qu'elles procuraient aux cellules souches non mutées. Ce regain d'activité était bienvenu, car ces cellules produisent des acteurs clés du système immunitaire, mais les cellules mutées ont pris le dessus et conduit au développement de leucémies.

À l'inverse, chez les souris jeunes, les populations de cellules mutées ne se sont pas développées. Avant leur injection, la croissance et

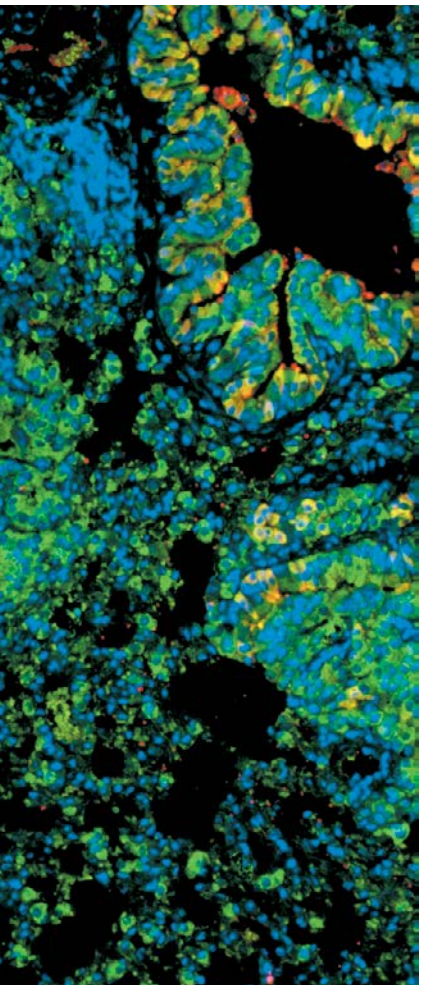


Les tumeurs précoces, comme celle ci-dessus *(en vert vif)* observée dans les tissus pulmonaires, se développent parce que leurs cellules acquièrent des caractéristiques qui les avantagent par rapport aux cellules saines.

la consommation énergétique des cellules souches saines correspondaient déjà à ce que leur environnement pouvait fournir. Par conséquent, elles n'ont rien gagné de l'introduction des cellules mutées. En privilégiant le *statu quo*, la jeunesse protège des tumeurs.

Pourquoi est-ce important ? Même si nous évitons certaines mutations en ne fumant pas et en restant à l'écart d'autres expositions mutagènes, nous ne pouvons échapper à la plupart des mutations que nous accumulons dans nos cellules au cours de la vie. Mais cette nouvelle perspective sur l'environnement tissulaire introduit un moyen de limiter le cancer : en réparant les altérations des tissus dues au vieillissement, au tabagisme et à d'autres agressions, on réduira le succès des mutations cancérogènes. Les mutations se produiront toujours, mais elles auront beaucoup moins de chances de donner un avantage aux cellules, lesquelles ne se multiplieront donc pas.

Certes, il n'existe pas de fontaine de jouvence pour inverser ou prévenir le vieillissement. Faire



es choses que nous savons bénéfiques, comme de l'exercice physique, manger équilibré et ne pas fumer, peut améliorer le maintien de nos tissus et est sans doute la meilleure stratégie disponible actuellement. Mais si nous réussissions à déterminer quels facteurs environnementaux tissulaires clés favorisent le développement du cancer, nous devrions être capables de les modifier pour limiter les tumeurs malignes. En effet, dans nos expériences sur les souris, nous avons montré que lorsque nous réduisions l'activité des protéines responsables de l'inflammation et des lésions tissulaires chez les souris âgées, les cellules portant les mutations cancéreuses ne proliféraient pas; les cellules normales restaient dominantes. Mais nous devons procéder avec prudence. Bloquer l'inflammation chez des souris vivant dans des cages stériles réduit peut-être le cancer, mais une stratégie similaire chez l'humain serait susceptible de limiter ses défenses contre les infections, car l'inflammation fait partie de notre réponse immunitaire.

CONTROLER LA RESISTANCE

Outre la prévention, une compréhension évolutive peut aider à élaborer des thérapies plus efficaces contre les cancers existants en réduisant la fâcheuse tendance des cellules cancéreuses à développer une résistance aux médicaments. L'évolution de la résistance est un phénomène bien connu dans d'autres domaines. Un exemple en est le conflit séculaire entre agriculteurs et insectes destructeurs de cultures. Pendant plus d'un siècle, des fabricants de pesticides ont produit un flot continu de nouveaux produits, mais les parasites ont toujours développé une résistance. Finalement, les fabricants ont reconnu qu'essayer d'éradiquer ces insectes en pulvérisant de fortes doses de pesticides sur les champs aggravait le problème en raison d'un processus évolutif nommé «libération compétitive».

Le mécanisme est le suivant. Dans un champ, tous les insectes sont continuellement en compétition pour la nourriture et l'espace, et ne sont pas identiques (à l'instar des cellules cancéreuses): au sein d'une population, il existe une variabilité inévitable d'un individu à l'autre pour presque tous les traits, y compris la sensibilité à un pesticide. En pulvérisant une grande quantité d'insecticide (ou en administrant une forte dose de chimiothérapie), l'agriculteur (ou l'oncologue) tue peut-être la grande majorité des insectes (ou des cellules cancéreuses), mais, une fois éliminés les organismes les plus vulnérables, quelques insectes (ou cellules) aux traits moins vulnérables ont le champ libre pour se propager.

Une stratégie agricole – la gestion intégrée des ravageurs – tente de remédier à cette situation en utilisant les pesticides avec parcimonie. Plutôt que d'essayer d'éradiquer les parasites, les agriculteurs pulvérisent juste assez de produit pour les contrôler et réduire les dégâts sur les cultures sans entraîner de libération compétitive. De cette manière, la sensibilité de l'organisme nuisible au pesticide est maintenue.

La communauté médicale a appris une leçon similaire des antibiotiques: il faut cesser leur usage excessif pour réduire le cycle évolutif constant qui favorise le développement d'agents pathogènes résistants aux médicaments. Mais cette leçon n'a pas encore pris racine en cancérologie. À l'instar des agriculteurs qui vaporisent d'énormes quantités d'insecticides dans les champs, les médecins administrent généralement la chimiothérapie à la «dose maximale tolérée» tant que la tumeur ne se remet pas à grossir. Presque tous les médicaments anticancéreux endommagent les tissus sains et leurs effets secondaires peuvent être très désagréables, voire fatals. La dose maximale tolérée est la quantité juste inférieure à la dose létale ou ayant des effets secondaires intolérables. Les médicaments sont considérés comme efficaces lorsque la tumeur diminue et le traitement est abandonné si elle grossit.

Pour la plupart des patients et des médecins, un traitement conçu pour éliminer le plus grand nombre possible de cellules cancéreuses en administrant sans relâche la plus grande quantité possible de médicaments toxiques semble être la meilleure approche. Mais comme pour le contrôle des insectes et des maladies infectieuses, cette stratégie, dans le cadre d'un cancer incurable, est souvent imprudente sur le plan de l'évolution, car elle déclenche une série d'événements qui, en réalité, accélèrent la croissance des cellules cancéreuses résistantes aux médicaments.

L'autre leçon tirée de la lutte contre les insectes ravageurs est qu'avec un «plan de gestion de la résistance», on peut garder sous contrôle les populations indésirables, souvent

Selon l'âge, les mêmes mutations ont des effets très différents sur le destin des cellules

> ndéfiniment. Cette stratégie fonctionnerait-elle aussi pour les patients atteints de cancers incurables ? La réponse n'est pas encore claire, mais des études expérimentales et des essais cliniques préliminaires le suggèrent.

Une thérapie consisterait, par exemple, à arrêter le traitement d'un patient dont la tumeur, après un mois de traitement anticancéreux, a diminué de 50%. Cette approche ne serait utilisée que dans les cas où les tentatives précédentes avec les traitements disponibles (chimiothérapie, hormonothérapie, chirurgie, stimulation du système immunitaire) auraient échoué. Le cancer étant incurable, l'objectif serait plutôt d'empêcher aussi longtemps que possible la tumeur de grandir et de se propager. En arrêtant le traitement, on laisserait vivre un grand nombre de cellules cancéreuses qui lui sont sensibles. La tumeur recommencerait alors à croître, jusqu'à sa taille initiale. Pendant cette période, aucune chimiothérapie ne serait administrée : la majorité des cellules tumorales seraient donc toujours sensibles aux médicaments anticancéreux. Et en contrôlant la croissance de ces cellules sensibles au traitement, on empêcherait celle des cellules résistantes. En conséquence, le traitement maintiendrait le contrôle de la tumeur bien plus longtemps que l'approche classique. Par ailleurs, la dose de médicament serait considérablement réduite, donc moins toxique et offrant une meilleure qualité de vie.

VERS UNE THÉRAPIE ADAPTATIVE

En 2006, l'équipe de l'un de nous (Robert Gatenby) a commencé par étudier l'approche à l'aide de modèles mathématiques et de simulations informatiques. De tels modèles sont rarement utilisés pour planifier le traitement d'un cancer, mais devant le nombre de traitements possibles, il était nécessaire d'adopter cette approche, classique en physique, qui aide à déterminer quelles méthodes expérimentales ont le plus de chances de réussir. Nos modèles ont défini les quantités à administrer de médicaments que nous voulions tester. L'étape suivante consistait à essayer ces doses sur des souris. Les expériences ont confirmé que de telles stratégies étaient susceptibles d'améliorer grandement le contrôle de la tumeur.

Les résultats étaient suffisamment bons pour nous inciter à tester l'approche sur des patients atteints de cancer. Avec l'aide de mathématiciens, de biologistes de l'évolution et de Jingsong Zhang, un oncologue du Moffitt Cancer Center qui traite des hommes atteints du cancer de la prostate, nous avons développé un modèle de dynamique de l'évolution des cellules cancéreuses de la prostate au cours du traitement. Nous avons utilisé ce modèle pour simuler les réponses du cancer de la prostate à diverses doses de médicaments administrées par un oncologue. Nous avons abouti à une série de doses qui contrôlaient le cancer pendant très longtemps sans augmenter la population de cellules résistantes aux médicaments.

Dans notre essai clinique, le contrôle moyen de la tumeur est au moins de 34 mois

Ensuite, nous avons demandé à des patients atteints d'un cancer agressif de la prostate avec métastases de se porter volontaires pour un essai clinique. Jusqu'à présent, les patients ont eu d'excellents résultats. Sur les 18 personnes inscrites, 11 sont encore en traitement. Le traitement standard maintient le contrôle du cancer métastatique de la prostate pendant 13 mois en moyenne. Dans notre essai, le contrôle moyen de la tumeur est au moins de 34 mois et, comme plus de la moitié de nos patients sont toujours traités, nous ne pouvons pas encore déterminer de limite maximale. De plus, ce contrôle est obtenu avec seulement 40% de la dose de médicament que le patient aurait reçue avec un traitement standard. Mais ce n'est que le début de cette approche. Ce n'est pas parce qu'elle fonctionne dans le cancer de la prostate qu'elle fonctionnera dans le cancer de l'estomac, par exemple. Et les patients auront peut-être du mal à accepter l'idée que la meilleure approche consiste à ne pas tuer autant de cellules cancéreuses que possible, mais aussi peu que nécessaire.

À bien des égards, la théorie de l'évolution permet de dissiper le « mystère » du cancer. La propension de la maladie à frapper sans cause claire, ainsi que sa capacité à vaincre et à revenir même après un traitement hautement toxique, laissent souvent les patients et les soignants dans un profond désarroi. En revanche, comprendre que le cancer obéit aux règles de l'évolution, comme tous les autres systèmes vivants, donne confiance en la possibilité de le contrôler. Depuis plus d'un siècle, les cancérologues cherchent des remèdes miracles, des médicaments capables d'éliminer toutes les cellules cancéreuses tout en épargnant les cellules normales. Le cancer a profité de l'évolution pour échapper à ces médicaments. Mais nous aussi allons l'utiliser. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. A. Gatenby *et al.*, **First strike – second strike strategies in metastatic cancer : Lessons from the evolutionary dynamics of extinction**, *Cancer Research*, vol. 79(13), pp. 3174-3177, 2019.

F. Thomas, **L'Abominable Secret du cancer**, Humensciences, 2019.

J. Zhang *et al.*, **Integrating evolutionary dynamics into treatment of metastatic castrate-resistant prostate cancer**, *Nature Communications*, vol. 8, article 1816, 2017.

conférences

accès gratuit

eudi 14 novembre à 14h

L'espace, une poubelle ?

Gérer ses déchets est la responsabilité qui incombe à tous ceux qui, en bons Homo sapiens, doivent mettre en place es cycles de retraitement des produits secondaires issus de leurs actions non naturelles. Un défi, un devoir tout simplement humain.

Avec, entre autres : **Jacques Arnould**, expert éthique au Cnes ; **Christophe Bonnal**, membre de l'AAE, expert Senior au Cnes.

21, 22, 23 novembre 2019

TIMEWORLD 2019

Congrès international sur le temps

TimeWorld valorise les intelligences connectées. Peut-on vivre sans calendrier ? L'ADN enregistre-t-il le temps qui passe ? Les atomes prennent-ils leur temps ? L'immortalité biologique : fiction ou réalité ? Les musiciens sont-ils des faiseurs de temps ? Si vous vous posez ces questions et bien d'autres sur le temps, le congrès TimeWorld est pour vous.

TimeWorld en bref :

- 120 intervenants
- 60 conférences
- 6 tables rondes
- 72 ateliers
- 500 m² d'exposition
- 2 concours
- 3 spectacles

› Centre des congrès - accès payant

nformations cite-sciences.fr ou palais-decouverte.fr

SCIENCE

FREDERIC THOMAS

est directeur de recherche au CNRS dans le laboratoire Mivegec, à l'université de Montpellier, où il codirige le Centre de recherches écologiques et évolutives sur le cancer. Dans son livre *L'Abominable Secret du cancer* (Humensciences, 2019), destiné au grand public, il revisite le cancer à la lumière de la biologie de l'évolution.

Nous sommes tous au minimum des cancéreux asymptomatiques

Et si le cancer était un processus inhérent à la vie des organismes complexes et soumis aux mêmes lois de l'évolution ? Cette idée modifie radicalement notre compréhension de la maladie. Les explications du biologiste de l'évolution Frédéric Thomas.

Frédéric Thomas a récemment publié : *L'Abominable Secret du cancer* (Humensciences, 2019).

Comment vous êtes-vous intéressé au cancer ?

Historiquement, j'ai été recruté au CNRS pour travailler sur les parasites, notamment les manipulateurs de comportement. Pendant plusieurs années, j'ai ainsi étudié des cas fascinants, comme ces vers trématodes qui atteignent le cerveau de petits crustacés, les gammares, et les font tourner à la surface de l'eau, offrant des proies faciles aux oiseaux aquatiques. Ou encore ce ver gordien qui pousse son hôte, un grillon des bois, à se suicider dans l'eau. Puis j'ai commencé à m'intéresser au cancer. Ma mère est morte d'un cancer. J'étais biologiste, mais n'ai rien pu faire. Cela m'a beaucoup affecté. Je voulais aussi me rendre davantage utile. J'ai donc décidé de partager l'activité du laboratoire entre parasites et cancer. On s'est alors aperçu qu'on était extrêmement productif sur le cancer parce que l'on arrivait avec un angle différent : on étudiait la maladie avec le prisme des sciences de l'évolution. De façon générale, on peut regarder toutes les maladies avec l'angle de la biologie évolutive. C'est ce qu'on appelle la médecine évolutionniste, qui rapproche santé, médecine et sciences de l'évolution.

Cet angle était nouveau dans l'étude du cancer ?

Pas exactement. Les premiers papiers qui ont commencé à présenter le cancer comme un problème d'évolution sont parus au milieu des années 1970, l'un dans *Nature*, l'autre dans *Science*. Mais, sans doute parce que les esprits n'étaient pas prêts à l'interdisciplinarité, ces articles sont passés à la trappe. C'est seulement durant la dernière décennie que l'on a commencé à réaliser à quel point l'adoption d'une vision évolutionniste du cancer améliore notre compréhension de la croissance des tumeurs, aide à mieux prévenir le cancer et à imaginer de nouvelles thérapies. En France, l'approche est encore peu développée, mais elle gagne de l'importance. Par exemple, en février dernier, la Société française du cancer m'a demandé d'organiser une journée de conférences sur le thème « Évolution et cancer ». Avec le budget accordé, nous avons réuni les meilleurs spécialistes au monde, venus des États-Unis, d'Australie, d'Angleterre – et ce à la demande des cancérologues. Je suis aussi régulièrement invité dans des congrès de cancérologie. C'est la preuve que les idées font leur chemin. La biologie évolutive est devenue incontournable dans la compréhension du cancer.

Comment est venue cette prise de conscience ?

Les thérapies anticancéreuses fonctionnaient chez les patients, puis n'avaient plus d'effet. Pendant longtemps, les cancérologues se sont demandé pourquoi. La biologie évolutive apporte une réponse simple : la sélection de résistances. Pesticides, bactéricides, insecticides… Les humains sont des spécialistes dans ce scénario qui consiste à éliminer tous ses ennemis et qui, très souvent, conduit à la sélection de résistances. Or il faut savoir que la quasi-totalité des gens qui meurent du cancer aujourd'hui sont des personnes chez qui les traitements ont sélectionné des résistances contre lesquelles on ne peut plus rien. Les thérapies extrêmement agressives contre le cancer ne sont donc qu'un exemple parmi une longue liste de stratégies martiales ignorant que la sélection existe et qu'elle constitue même une des forces les plus puissantes du vivant. Bien sûr, il faut traiter les personnes atteintes d'un cancer, sinon elles mourraient plus vite. Mais il s'agit de trouver des traitements qui sauvent durablement les personnes et leur offrent un mode de vie acceptable. Le cancer évolue. C'est certes une mauvaise nouvelle, mais aussi une bonne pour les biologistes, car cela signifie qu'en théorie, on peut apprendre à orienter son évolution jusqu'à un état stable qui ne nous tuera pas. C'est tout l'enjeu des thérapies modernes : apprendre à gouverner l'évolution du cancer.

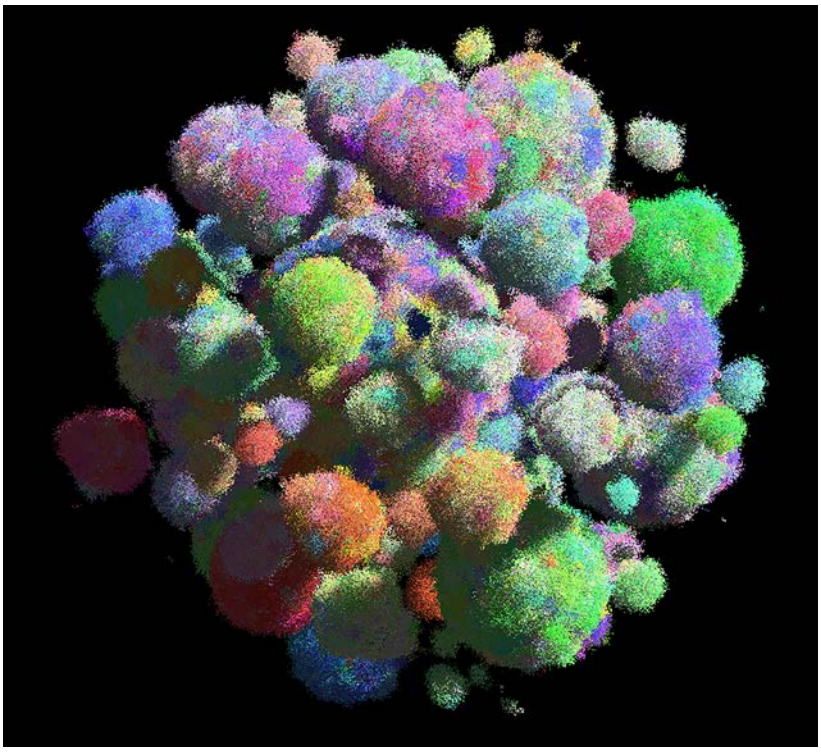
Comment définiriez-vous le cancer d'un point de vue évolutif ?

C'est un processus d'évolution clonale à l'intérieur du corps. Un organisme multicellulaire est une société de clones qui coopèrent entre eux. L'humain en compte trente mille milliards, produits à partir d'une seule cellule ! Ces cellules se spécialisent et se différencient en activant différentes parties du même génome. Le cancer relève du même mécanisme. Ce qui est fascinant avec le cancer, c'est que tout repose sur le détournement d'une boîte à outils – la même qui a façonné la vie. Un œuf fécondé contient une boîte à outils avec un programme façonné par l'évolution, qui produit en neuf mois un joli bébé. Le cancer doit réinventer la roue à chaque fois, car en dehors des cancers transmissibles, rencontrés chez certains animaux comme le diable de Tasmanie, toute la diversité qu'il a produite chez un individu disparaît avec lui. À partir d'une seule cellule, le cancer arrive ainsi parfois à refabriquer l'équivalent d'un organe avec une structuration et répartition des tâches. Une tumeur est loin d'être un amas désorganisé de cellules, et tout cela se fait par sélection en temps réel. C'est pour cette raison que le cancer évolue en général assez lentement vers une tumeur solide. Sauf si on admet l'hypothèse atavique du cancer.

De quoi s'agit-il ?

Selon cette hypothèse, le cancer correspondrait à la réactivation de programmes ancestraux sélectionnés pendant le Précambrien. Il y a 2 milliards d'années, la Terre n'était peuplée que d'organismes unicellulaires et, pour faire simple, la seule chose qu'on leur demandait était de proliférer, souvent dans des conditions

difficiles. Puis, il y a plus de 1,5 milliard d'années, la multicellularité s'est construite à partir de cette unicellularité. Si la sélection naturelle travaillait comme un parfait ingénieur, elle aurait bâti le monde multicellulaire simplement en éliminant nombre des adaptations des organismes unicellulaires. Mais elle travaille comme un bricoleur dépourvu de tout sens moral qui ne fait qu'optimiser une situation par rapport à l'étape précédente, sans objectif à long terme. Dans ce cadre, certaines adaptations de ces organismes unicellulaires n'auraient pas été complètement éliminées de nos génomes, et leur réactivation accidentelle conduirait à ce résultat ubuesque, où des organismes complexes et modernes se retrouveraient soudainement en compétition avec des entités unicellulaires qui disposent d'outils du Précambrien. Cela expliquerait peut-être pourquoi les cellules cancéreuses sont particulièrement à l'aise dans des environnements acides, anoxiques, puisque ces conditions prévalaient souvent à l'époque.



Une tumeur ressemble à un écosystème : au fil de leurs divisions et de leurs déplacements, les cellules cancéreuses accumulent des mutations et forment des populations composites soumises aux lois de la sélection naturelle, comme le montre cette modélisation de la croissance d'une tumeur. Chaque point de couleur représente une cellule. Plus les couleurs sont proches, plus les génomes sont similaires.

Pourquoi l'évolution n'a-t-elle pas éliminé le cancer, s'il est délétère pour les individus ?

Parce que c'est trop coûteux en énergie, comme pour les parasites : on pourrait avoir des défenses pour tuer tous les parasites, mais l'évolution ne peut retenir une telle option si celle-ci se fait au détriment de la reproduction… En théorie, nous pourrions être beaucoup plus résistants au cancer. Mais imaginez que cela nécessite tellement d'énergie et de ressources que vous ne vous reproduisiez plus. En monnaie darwinienne, cela ne marchera jamais : à l'échelle de l'évolution, il vaut mieux être vulnérable au cancer en s'étant reproduit auparavant que complètement résistant sans avoir la capacité de se reproduire tant la résistance est coûteuse. Car, rappelons-le, la sélection naturelle favorise non pas la survie, mais la reproduction. Elle a ainsi fortement favorisé notre résistance au cancer tant que nous sommes reproducteurs. C'est le drame de la sénescence, qui a horrifié Charles Darwin lorsqu'il est arrivé à cette conclusion que tout ce qui nous arrive après la reproduction est quasiment neutre d'un point de vue évolutif, sauf chez les espèces qui prodiguent des soins grands-parentaux.

Des mécanismes encore plus vicieux maintiennent aussi, à une fréquence plus élevée qu'attendu, des mutations oncogéniques dans les populations. C'est le cas de la « pléiotropie antagoniste » – le fait que certains gènes ont un effet positif en début de vie et négatif en fin de vie. Si l'effet positif procure un avantage énorme à ses porteurs, la sélection naturelle le retient parce qu'il se traduit par une meilleure reproduction, même si, plus tard, il confère une maladie. Par exemple, au Mexique, les poissons mâles du genre *Xiphophorus* meurent souvent d'un mélanome dû à une mutation congénitale. Des chercheurs se sont aperçus que les gènes qui conduisent à ce cancer sont extrêmement bénéfiques en début de vie, car les poissons porteurs ont une meilleure croissance : ils grandissent plus vite, deviennent plus gros et plus agressifs. Ils défendent donc bien mieux leur territoire et sont donc préférés des femelles dans le cadre de la sélection sexuelle. Ainsi, même s'ils meurent plus tôt que les autres, ils se reproduisent davantage.

C'est aussi le cas des diables de Tasmanie, qui sont victimes d'un cancer de la joue directement transmissible. Seuls les mâles agressifs, qui combattent les autres mâles, accèdent aux femelles. Mais c'est en mordant leurs adversaires qu'ils attrapent le cancer…

Observe-t-on des mécanismes similaires chez l'humain ?

Quelques travaux suggèrent qu'il y a également de la pléiotropie antagoniste chez l'humain. En 2012, notamment, Ken Smith, de l'université d'Utah, et ses collègues ont montré, sur une cohorte de mormons suivie depuis très longtemps, que les femmes mutées sur le gène *BRCA1* – ce qui augmente considérablement le risque de cancer du sein – avaient une fertilité supérieure. Plusieurs travaux ont aussi suggéré qu'un excès de testostérone chez l'homme influerait sur sa musculature, certains traits du visage, sa voix et s'accompagnerait d'un succès reproducteur, mais favoriserait aussi le cancer de la prostate. Mais cela reste à confirmer.

Réparation de l'ADN, système immunitaire, apoptose… l'organisme a développé de nombreux mécanismes pour éliminer les cellules dissidentes. Comment un cancer s'établit-il chez un individu ?

Le monde ne se divise pas en deux, ceux qui auraient un cancer et ceux qui n'en auraient pas. Nous avons tous des processus oncogéniques dans le corps. Et plus on vieillit, plus on en a. C'est la conclusion à laquelle un nombre croissant d'études arrivent, fondées sur l'analyse sur autopsie de personnes mortes pour d'autres raisons (autres maladies, accidents de voiture…) : nous sommes tous au minimum des cancéreux asymptomatiques. Nous avons en permanence des cellules précancéreuses, voire cancéreuses, partout dans l'organisme. Donc la vraie question est de savoir lesquelles évolueront vers cette toute petite fraction qui conduira à un cancer invasif. La plupart du temps, les autres processus oncogéniques sont inoffensifs. S'ils devaient vous tuer, ils le feraient à vos 210 ans. Il n'y a donc aucun intérêt à les retirer. La vraie prévention serait de retirer uniquement la fraction destinée à devenir invasive.

A-t-on des pistes pour y parvenir ?

Les biologistes de l'évolution apportent des éléments de réponse. Notamment, en 2017, Carlo Maley, de l'université d'État de l'Arizona, et ses collègues ont élaboré un « index éco-évo » dans lequel ils ont défini 16 types de cancer en se fondant sur des variables écologiques comme le taux d'irrigation d'une tumeur, des variables d'environnement comme l'acidité et des variables évolutives comme le renouvellement cellulaire et le taux de prédation par le système immunitaire. Les tumeurs les moins dangereuses – les « déserts » – sont celles qui se renouvellent très peu, sont très peu irriguées et, de fait, évolutivement inertes. Les plus dangereuses – les « forêts humides » – se renouvellent très vite et sont fortement attaquées par le système immunitaire, ce qui fait que très rapidement, des cellules invisibles pour le système immunitaire sont sélectionnées. Il faut retirer ces tumeurs les plus dangereuses tant qu'elles n'ont pas commencé à diffuser, et adopter d'autres thérapies quand, hélas, elles sont devenues métastatiques. En 2018, Carlo Maley a obtenu 8 millions de dollars pour créer un Centre évolution et cancer en Arizona où biologistes de l'évolution et cancérologues travaillent ensemble. En évaluant le type de tumeur de chaque patient avec ces critères, il espère adapter de façon plus personnalisée les thérapies aux caractéristiques de la tumeur.

Quelles autres pistes thérapeutiques l'approche évolutive ouvre-t-elle ?

Actuellement, ce que l'on considère comme une bonne thérapie anticancéreuse est un traitement qui tue le maximum de cellules sans tuer le patient. On n'examine que dans un deuxième temps si sa survie est améliorée. Or l'un n'implique pas forcément l'autre. La meilleure preuve est la thérapie adaptative proposée par Robert Gatenby, au Moffitt Cancer Center, à Tampa, en Floride (*voir l'article page 26*). Quand on découvre une tumeur, on s'aperçoit de plus en plus, même si la personne n'a pas encore de symptômes, qu'elle contient des variants de gènes résistants aux traitements. Cela signifie que si on les attaque avec une thérapie lourde, on tuera certes toutes les cellules sensibles, mais, ce faisant, on offrira une double victoire aux cellules résistantes : non seulement elles résisteront, mais elles n'auront plus de compétiteurs puisque les cellules sensibles seront mortes. C'est à tout prix le scénario qu'il faut éviter. Robert Gatenby traite une petite partie de la tumeur. Il l'empêche ainsi de grossir et, surtout, maintient la compétition avec les cellules sensibles. Il mise sur le fait que les cellules cancéreuses ne sont pas des démons darwiniens qui ont une capacité maximale sur tout. Elles ont leur talon d'Achille : leur résistance a un coût qui leur confère une faiblesse. Robert Gatenby a commencé avec des modèles mathématiques, puis a mené des expériences sur des souris. À présent, il traite des patients atteints de cancers métastatiques de la prostate résistants aux traitements classiques et obtient des résultats significatifs sur la survie.

C'est donc encore une question de coût…

Exactement. Ce qui nous a amenés à nous demander, au laboratoire, si Robert Gatenby était l'inventeur de la thérapie adaptative ou si la sélection naturelle l'avait créée. Imaginez une tumeur dont les cellules seraient résistantes non pas aux thérapies, mais à un système immunitaire. À force de traquer les cellules cancéreuses, ce dernier finirait par sélectionner celles qu'il ne détecte pas. Et s'il appliquait cette stratégie jusqu'au bout, il tuerait la totalité des cellules cancéreuses rencontrées et celles qui lui sont invisibles gagneraient deux fois pour les mêmes raisons. On mourrait ainsi très tôt. Il y a donc fort à parier que, sur des temps évolutifs, la sélection naturelle a optimisé notre système immunitaire pour qu'il ne tue pas la totalité des cellules cancéreuses qu'il détecte. Quand vous ne pouvez plus tuer votre ennemi, affaiblissez-le en lui laissant des compétiteurs.

Qu'en déduire pour les thérapies ?

Il ne faut pas oublier que nos défenses naturelles ont été mises en place à une période très différente de la vie humaine sur Terre. On vivait moins longtemps et on était moins exposé à des mutagènes : les hommes préhistoriques, par exemple, mangeaient bio. Il n'y avait ni gasoil ni particules fines… Aujourd'hui, le monde a changé. On vit plus longtemps, on est exposé à >

des mutagènes en tous genres. Notre arsenal de défense contre le cancer s'est donc mis en place à une époque révolue et n'est pas optimal pour nous protéger aujourd'hui. Cela signifie que forcer notre système immunitaire à tuer plus de cellules cancéreuses qu'il n'a prévu de le faire, comme le font certaines immunothérapies, est potentiellement dangereux puisque l'on risque de se retrouver dans l'impasse d'une sélection trop forte sur les cellules cancéreuses.

Attention, cela ne signifie pas qu'il faut jeter l'immunothérapie. Elle fait partie des voies les plus prometteuses pour plusieurs raisons. D'abord parce que, la sélection naturelle ayant optimisé nos défenses pour maximiser la reproduction, quitte à mourir tôt, il n'y a pas lieu de se satisfaire de thérapies naturelles qui nous amènent à une issue ne correspondant plus à notre attente – vivre plus longtemps en bonne santé. Or en modifiant des cellules immunitaires pour qu'elles ciblent mieux les cellules cancéreuses, l'immunothérapie offre un outil pour nous mettre en adéquation avec notre attente. Ensuite, si l'immunothérapie est bien ajustée, si l'on arrive à gérer les dégâts collatéraux, elle peut très bien fonctionner.

Quelles autres idées explore-t-on pour contraindre l'évolution du cancer ?

Une thérapie très intéressante en cours d'élaboration est celle des « faux médicaments ». La plupart du temps, les cellules cancéreuses résistantes le sont parce que leur membrane porte des pompes qui détectent le poison. Le poison rentre, les pompes l'expulsent et les cellules ne sont pas tuées. Imaginez un faux médicament qui imite l'effet d'un vrai poison, obligeant les cellules résistantes à l'expulser. Elles vont simplement s'épuiser, ce qui donnera un avantage sélectif à la partie de la population sans pompe, et donc sensible au poison. Si vous donnez ensuite un vrai médicament, vous tuerez une partie des cellules sensibles, ce qui empêchera la tumeur de grossir. En alternant vrai et faux médicament, on devrait ainsi en théorie obtenir un système stable et reléguer le cancer au rang de maladie chronique dont on ne meurt plus.

Une autre piste prometteuse est d'utiliser le principe du détecteur de fumée. Les cellules cancéreuses sont extrêmement instables génétiquement. Elles doivent en permanence réparer leur ADN sinon elles ne fonctionneraient plus. Une première idée a donc consisté à les empêcher de se réparer, à l'aide du principe de « létalité synthétique ». Cette thérapie est fascinante. Elle vise à exploiter une faiblesse du cancer : on regarde où les cellules cancéreuses sont mutées et on saborde les voies alternatives qu'elle utilise. Par exemple, les gènes *BRCA* interviennent dans la réparation de l'ADN. Quand leur mutation survient localement dans une tumeur, la fréquence des mutations dans ces cellules augmente, faute de réparation. Mais si l'on bloque une autre voie de réparation de l'ADN (la voie PARP), les cellules cancéreuses ne se réparent plus du tout et en meurent. Toutefois, tôt ou tard, elles trouvent une parade. Aussi, Marie Dutreix, à l'institut Curie, et ses collègues ont eu une autre idée : au lieu d'empêcher les cellules de se réparer, ils les mondent d'un signal (un fragment d'ADN imitant une cassure de la molécule) leur faisant croire que des problèmes surviennent tout le long de leur ADN. Alertées par cette fausse alarme, les cellules cancéreuses essayent massivement de réparer leur ADN… pour rien. Épuisées, devenues moins compétitives, nombre d'entre elles meurent en dix semaines. Et celles qui résistent arrêtent de répondre à l'alarme, comme on le ferait avec un détecteur de fumée mal réglé. Quand elles ne réagissent plus, c'est le moment de les attaquer, ce qui cause des dégâts considérables dans la tumeur. Des essais sur la souris sont en cours.

L'écologie est même une source d'inspiration…

Oui, comme le principe de la double contrainte, très exploité en lutte biologique. Une façon de canaliser la démographie d'un organisme nuisible est de lui imposer une double contrainte : par exemple obliger une population de rongeurs à fréquenter un habitat où des rapaces les attaquent ou un endroit peuplé de serpents. Ce principe est largement utilisé en trithérapie. On s'aperçoit aussi que l'on a beaucoup à apprendre de l'extinction des espèces. Dans la plupart des cas, le scénario est le même : un événement majeur fait passer une grande population, avec toute sa diversité, à son seuil minimal de viabilité. Puis de petits événements,

Le rat-taupe nu est doté d'une étonnante longévité : il est capable de vivre plus de trente ans en captivité, contre quatre ans pour un rat. Il est aussi très résistant au cancer. Pourquoi ? Pour Frédéric Thomas, la réponse vient peut-être de son mode de vie eusocial : comme chez les fourmis, seuls quelques individus se reproduisent ; les autres sont des ouvriers. Les colonies avec ouvriers sans sénescence ont certainement eu un avantage évolutif sur les autres.

Les cellules cancéreuses ne sont pas des démons darwiniens

qui n'auraient eu aucun effet sur la grande population, terminent le travail, sans sélectionner de résistance. En juillet dernier, en s'appuyant sur un modèle mathématique, l'équipe de Robert Gatenby a proposé d'utiliser la même stratégie contre des cancers métastatiques : on commencerait par frapper fort avec une thérapie drastique. On l'arrêterait avant que les cellules cancéreuses développent des résistances et on appliquerait ensuite une multitude de petites thérapies sublétales pour le cancer.

Pour James DeGregori, de l'université du Colorado à Denver, le problème du cancer n'est pas tant la survenue de mutations que l'apparition d'un microenvironnement favorable à la croissance des cellules qui les portent. La difficulté survient lorsque le paysage sélectif change et avantage les cellules porteuses de ces mutations. C'est ce qui se passe quand on vieillit ou quand on modifie son habitat, en fumant par exemple. L'idée de James DeGregori est de rétablir les paramètres de l'habitat pour diminuer l'avantage sélectif des cellules porteuses de mutations en jouant sur le microenvironnement, et non sur les cellules elles-mêmes.

D'autres pistes visent non pas à tuer le cancer, mais à réduire sa vitesse d'évolution en diminuant le taux de mutation ou de division cellulaire, ou en réduisant les différences entre cellules cancéreuses. On parle même d'écologie tumorale pour décrire le fait qu'une tumeur qui grossit est le résultat net d'un ensemble d'interactions variées : coopération, parasitisme, compétition, prédation par le système immunitaire… Comprendre cette écologie tumorale nous aidera peut-être à manipuler ces interactions pour déstructurer les tumeurs. Par exemple, comme un parasite, le cancer repose sur l'exploitation des cellules saines alentour. Or ces cellules sont beaucoup plus faciles à tuer car elles ne varient pas. C'est certainement une voie intéressante.

Pourquoi les tumeurs produisent-elles parfois des métastases ?

On ne sait pas pourquoi, brusquement, des cellules cancéreuses quittent la tumeur. Est-ce un problème purement physique ? Des conditions écologiques locales devenues désastreuses ? Pas assez de nourriture, un métabolisme particulier qui rend la situation intenable ? L'équipe de Robert Gatenby a observé qu'en nourrissant les tumeurs avec de petites quantités, très régulièrement, on diminue leur propension à produire des métastases. En revanche, si on les affame, avec par exemple un traitement qui bloque la croissance des vaisseaux sanguins, et si un vaisseau réussit quand même à s'installer dans la tumeur, les cellules cancéreuses s'échappent massivement.

Qu'étudiez-vous plus spécifiquement ?

Toute une partie de nos recherches est consacrée au rôle des processus cancéreux chez les espèces animales et dans le fonctionnement des écosystèmes. Le cancer a façonné le vivant depuis plus d'un milliard d'années et certaines espèces ont développé des défenses. L'éléphant possède 20 copies d'un gène suppresseur de tumeurs là où l'humain n'en a qu'une. Le rat-taupe nu, particulièrement résistant au cancer, le doit en partie à l'acide hyaluronique qui encercle les cellules de sa peau et les empêche de se multiplier de façon anarchique. Nous essayons de comprendre comment le cancer influence le vivant. Par exemple, les individus plus vulnérables au cancer ont-ils besoin de plus de sommeil ? Nous avons aussi récemment proposé que le cancer soit à l'origine du sexe : comme il a plus de chances de passer chez un embryon identique à la mère, l'évolution aurait privilégié la reproduction sexuée, qui brasse les gènes.

Nous avons par ailleurs soumis un article sur l'évolution de la ménopause : pourquoi seuls les humains et deux espèces de baleines ont un arrêt de la reproduction avant l'arrêt de la vie ? On s'est aperçu qu'à chaque grossesse, les tumeurs déjà présentes chez une femme grossissent. Donc plus elle se reproduit tard, plus le risque que ces tumeurs deviennent cancéreuses est grand. La sélection naturelle aurait ainsi favorisé les femmes qui avaient une cessation de reproduction, ce qui non seulement diminuait le risque de développer un cancer, mais permettait de prodiguer des soins aux petits-enfants.

Nous avons aussi un projet de recherche sur les cancers transmissibles avec l'Australie, et plein d'autres très variés, comme étudier les cancers d'origine infectieuse, examiner si les souris détectent une congénère atteinte d'un cancer ou encore comprendre l'évolution des cancers chez les hydres – des animaux immortels chez qui le cancer se transmet de mère en fille. Plus que jamais, les équipes interdisciplinaires sont prometteuses contre le cancer et, plus que jamais, il faut faire confiance aux médecins et aux chercheurs, et garder espoir. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

J. F. Lemaitre *et al.*, **Eco-evolutionary perspectives of the dynamic relationships linking senescence and cancer,** *Functional Ecology*, sous presse.

F. Thomas *et al.*, **Transmissible cancer and the evolution of sex,** *Plos Biology*, vol. 17, article e3000275, 2019.

F. Thomas *et al.*, **Is adaptive therapy natural ?,** *Plos Biology*, vol. 16, article e2007066, 2018.

C. Maley *et al.*, **Classifying the evolutionary and ecological features of neoplasms,** *Nature Reviews Cancer*, vol. 17, pp. 605-619, 2017.

L'ESSENTIEL

- Les mouvements au sein du noyau de fer liquide de la Terre créent un effet dynamo, à l'origine du champ magnétique de la planète.
- Si Joseph Larmor a esquissé les grandes lignes de ce mécanisme il y a cent ans, le phénomène reste encore un domaine de recherche actif, à la frontière de diverses disciplines : la géophysique, les mathématiques et la physique expérimentale.
- De prochaines expériences visent à mieux comprendre les mécanismes de génération du champ magnétique et la dynamique d'inversion des pôles.

L'AUTEUR

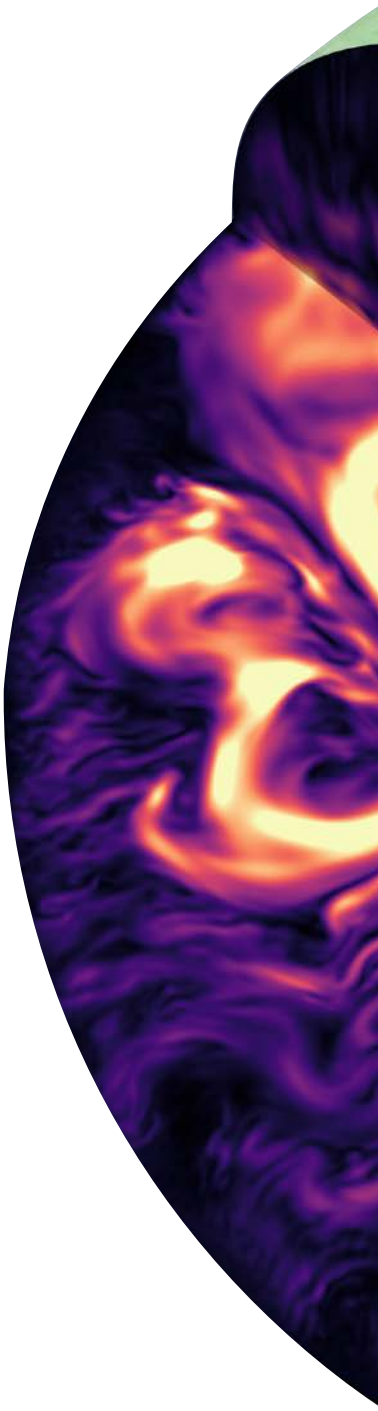
EMMANUEL DORMY
directeur de recherche du CNRS à l'École normale supérieure, à Paris, et professeur à l'École polytechnique, à Palaiseau

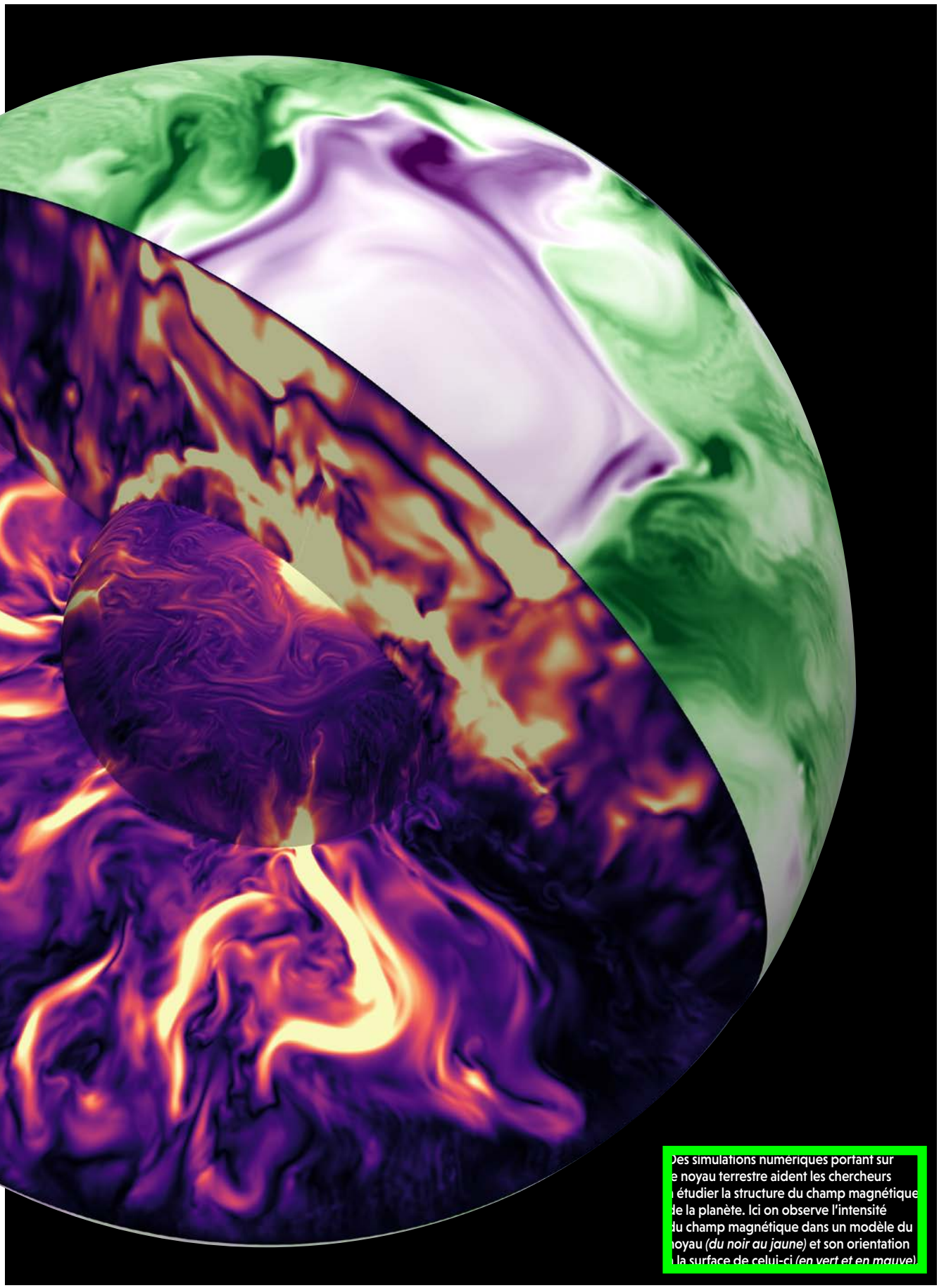
La dynamo terrestre, un défi centenaire

D'où provient le champ magnétique de la Terre ? Il y a cent ans, Joseph Larmor proposait une réponse : un effet dynamo dû aux mouvements du fer liquide au sein du noyau terrestre. En dépit des difficultés mathématiques et techniques, calculs théoriques, simulations numériques et expérience de laboratoire confirment ce scénario.

Nous avons tous joué un jour avec une boussole. L'expérience, bien que simple, est fascinante. L'aiguille s'oriente systématiquement dans une direction privilégiée, le « Nord ». Lorsqu'on cherche à l'en dévier, elle oscille et revient dans sa direction d'origine. Si l'on approche un aimant, elle se met à osciller rapidement et finit par s'orienter vers l'aimant. Cette expérience à la portée de tous ne manque pas de surprendre et de réveiller la curiosité scientifique qui nous anime. Dans son autobiographie, Albert Einstein a écrit qu'à l'âge de quatre ou cinq ans, alors qu'il était malade, son père lui a offert une boussole. Il était captivé : « Que l'aiguille se comporte de façon aussi précise sans qu'on la touche ne rentrait pas dans mes schémas de compréhension du monde... Je me souviens, ou je crois me souvenir, que cet événement me laissa une impression profonde et durable. Il devait y avoir un ordre caché derrière l'apparence des choses. » Ce besoin de comprendre a amené le jeune Einstein à faire des découvertes spectaculaires. Mais qu'en est-il de cette boussole si fascinante ?

Dès le IVe siècle avant notre ère, les Chinois utilisaient un « indicateur austral » (les boussoles chinoises indiquaient de préférence le sud) pour se repérer. À l'époque Han, la boussole était constituée d'une cuillère en magnétite (un oxyde de fer présentant une aimantation permanente) dont la queue pointe vers le sud. Il faut attendre le XIe siècle pour voir les premières références à l'utilisation de





Des simulations numériques portant sur le noyau terrestre aident les chercheurs à étudier la structure du champ magnétique de la planète. Ici on observe l'intensité du champ magnétique dans un modèle du noyau *(du noir au jaune)* et son orientation à la surface de celui-ci *(en vert et en mauve)*.

boussoles pour la navigation. Puis l'innovation technique s'est propagée vers l'Europe, où la première mention se trouve dans l'ouvrage *De Naturis Rerum*, du philosophe anglais Alexandre Neckham, en 1190.

On sait aujourd'hui que l'orientation de la boussole est liée à la présence d'un champ magnétique global, à l'échelle de la planète (*voir l'encadré ci-contre*). Mais l'origine de ce champ est longtemps restée inexpliquée. Elle a intrigué de nombreux savants, comme René Descartes, Edmond Halley ou encore André-Marie Ampère. Mais c'est en 1919, il y a tout juste cent ans, que le Britannique Joseph Larmor a posé les bases expliquant l'origine du champ magnétique terrestre. Depuis, notre compréhension de la dynamo terrestre a bien progressé, grâce à des approches tant théoriques et mathématiques qu'expérimentales et numériques.

L'intérêt d'étudier la dynamo terrestre ne se limite pas à la Terre. D'autres planètes, les étoiles et même les galaxies sont dotées de champs magnétiques dont le mécanisme sous-jacent est similaire. La Terre constitue dès lors un bon modèle pour comprendre ce phénomène complexe.

LA TERRE, UN AIMANT GÉANT ?

On attribue les premières expériences systématiques sur le champ magnétique terrestre à William Gilbert. Vers 1600, cet astronome anglais cherchait à comprendre les causes de l'alignement des boussoles. L'idée la plus naturelle est de supposer que la Terre comporte un aimant gigantesque en son centre. Les lignes de champ magnétique émergent du sol dans l'hémisphère Sud et remontent vers l'hémisphère Nord en suivant les méridiens, avant de replonger dans la planète. Pour tester cette hypothèse, le savant anglais a conçu un aimant sphérique, qu'il a nommé *terrella* (« petite terre » en latin). Lorsqu'il en approchait une boussole, l'aiguille pointait vers le pôle nord de la sphère. Il rendait aussi compte du fait, observé par ailleurs, que l'aiguille ne reste pas horizontale par rapport au sol mais s'incline en pointant vers le nord.

Mais si un aimant géant, c'est-à-dire un dipôle magnétique présentant un pôle sud et un pôle nord, explique bien le comportement d'une boussole, le modèle est trop simple. Il n'explique pas les variations du champ magnétique terrestre au cours du temps. En effet, en 1634, Henry Gellibrand, professeur d'astronomie au Gresham College, à Londres, a montré que le pôle nord du dipôle magnétique indiqué par la boussole se déplace. Il avait mesuré une déclinaison (l'angle entre le pôle nord magnétique et le pôle Nord géographique défini par l'axe de rotation de la Terre) de 4,1° vers l'est ; or des mesures de ses prédécesseurs indiquaient respectivement une déclinaison de 6° vers l'est en 1622, et un angle de 11,3° vers l'est en 1580. En supposant que ces relevés étaient fiables, Gellibrand a conclu que le champ magnétique terrestre évoluait dans le temps, contrairement à celui d'un simple dipôle.

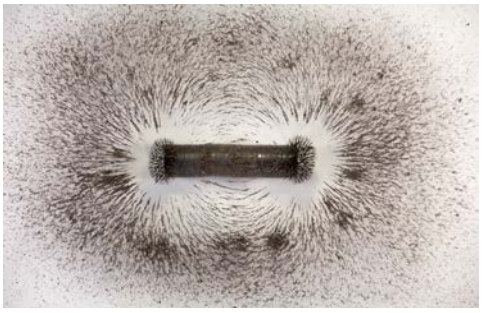
La seconde raison qui permet d'exclure un aimant géant est plus fondamentale. On sait, depuis les travaux de thèse de Pierre Curie, en 1895, qu'au-delà d'une certaine température, dite « de Curie » (habituellement de quelques centaines de degrés), les matériaux ferromagnétiques, telle la magnétite, perdent leur aimantation permanente à cause de l'agitation thermique. Or la température à l'intérieur de la Terre augmente rapidement avec la profondeur (c'est le « gradient géothermique ») et est estimée dans le noyau à quelques milliers

REPRÉSENTER LE CHAMP MAGNÉTIQUE

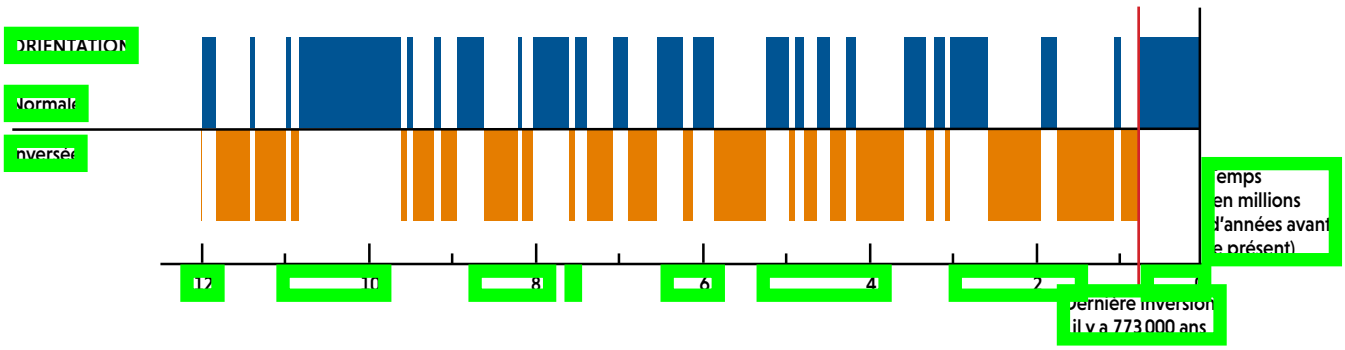
La force qui oriente la boussole agit à distance, sans contact avec l'aiguille. Le phénomène peut sembler mystérieux, bien qu'il en aille de même avec la force gravitationnelle lorsque nous sautons en l'air. Cela nous surprend moins car nous rencontrons la gravité et l'expérimentons dès le plus jeune âge.

Le parallèle entre gravité et magnétisme ne s'arrête pas là. Pour étudier ces deux forces, on utilise la notion de champ. Un champ indique en tout point de l'espace l'intensité d'une grandeur, comme la température ou la vitesse des vents sur une carte météorologique. Pour les vents, il faut aussi indiquer la direction ; on utilise alors un champ de vecteurs. C'est aussi le cas pour le champ gravitationnel : il faut indiquer, en tout point de l'espace, dans quelle direction la force s'exerce (vers le centre de la Terre pour faire simple). Pour le champ magnétique, en chaque point, le vecteur indique la direction dans laquelle s'orienterait une boussole imaginaire placée en ce point. La longueur de chaque vecteur indique l'intensité de la force en ce point. Dans le cas de la gravité, son intensité décroît à mesure que l'on s'éloigne de la Terre. À la surface de la Terre, elle est constante en première approximation. On peut la mesurer avec un pendule que l'on écarte de sa position d'équilibre. Si l'amplitude des oscillations n'est pas trop grande, leur période ne dépend que de la longueur du balancier et de la force de gravité locale : c'est ce qui a fait le succès des horloges à balancier (au XIXe siècle).

De la même façon, lorsque l'on écarte l'aiguille de la boussole de sa position d'équilibre, elle oscille avec une période qui dépend de l'intensité du champ magnétique local. Plus celle-ci est élevée, plus l'aiguille oscille vite. C'est ainsi que Carl Friedrich Gauss a effectué les premières mesures d'intensité du champ magnétique terrestre, en 1832. Dans le cas d'un petit aimant, on peut visualiser le champ magnétique à l'aide de limaille de fer *(voir l'image ci-contre)*.



pourlascience.fr



Le champ magnétique terrestre s'est inversé de nombreuses fois au cours de son histoire. Le pôle Nord magnétique se retrouve alors à proximité soit du pôle Nord géographique, soit du pôle Sud géographique. L'étude des roches volcaniques permet d'établir la chronologie des époques où le champ était orienté de façon normale *(en bleu)* ou inversée *(en orange)*. Le pôle de polarité Nord de l'aimant terrestre est actuellement situé près du pôle Sud géographique, on dénote par convention cette configuration comme « normale ».

le degrés, bien au-delà de la température de Curie du fer. Impossible d'avoir un aimant permanent dans ces conditions.

Mais alors, d'où provient le champ magnétique terrestre ? Au XIXe siècle, Ampère a proposé une nouvelle piste en s'appuyant sur les expériences de Hans Christian Ørsted, qui découvrit en 1820 un lien entre électricité et magnétisme. Ce physicien danois montra qu'en faisant circuler un courant électrique dans un conducteur, on dévie l'aiguille d'une boussole placée à proximité : un courant électrique produit un champ magnétique. Deux ans plus tard, Ampère proposa que le magnétisme terrestre était lié à des courants électriques à l'intérieur de la Terre : « L'idée la plus simple, et celle qui se présenterait immédiatement à celui qui voudrait expliquer cette direction constante de l'aiguille, ne serait-elle pas d'admettre dans la Terre [...] un courant électrique perpendiculaire au méridien magnétique ? » L'origine dudit courant électrique restait cependant à déterminer.

Serait-ce un courant momentané ? On peut calculer qu'un courant électrique non entretenu se dissiperait sous forme de chaleur en quelque dix mille ans, à cause de la résistivité électrique de la planète. Mais la Terre a un champ magnétique depuis plusieurs milliards d'années, montrent les enregistrements fossiles.

Ces enregistrements fossiles consistent en des coulées volcaniques qui contiennent des minéraux ferrifères (comme la magnétite). En se refroidissant, elles produisent des roches dont l'aimantation s'oriente selon la direction du champ magnétique de l'époque et du lieu de la coulée (un mécanisme comparable existe dans les sédiments au fond des lacs). Or en 1906, le géophysicien français Bernard Brunhes a mis en évidence que des coulées successives en un même lieu indiquaient parfois un nord géomagnétique proche du nord géographique, parfois un nord géomagnétique proche du sud géographique. Il venait de découvrir les inversions du champ magnétique terrestre (*voir la figure ci-dessus*). S'il a fallu près d'un demi-siècle pour que sa découverte soit acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique, elle est aujourd'hui bien établie : le champ magnétique de la Terre s'est inversé plusieurs fois au cours de son histoire.

LA VALSE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Ces inversions se produisent de façon irrégulière. Une période dure en moyenne quelques centaines de milliers d'années, mais la planète a aussi connu des périodes de plus de 30 millions d'années sans inversion. La dernière inversion date d'il y a 773 000 ans. La durée d'une inversion peut être déterminée soit par la lente décroissance de l'intensité qui la précède, soit par le changement de direction plus rapide. En 2012, l'équipe de Jean-Pierre Valet, de l'institut de physique du globe de Paris, a montré que cette étape durait environ mille ans. En 2019, Brad Singer, de l'université du Wisconsin, aux États-Unis, et ses collègues ont proposé qu'elle puisse durer jusqu'à vingt-deux mille ans. D'autres analyses seront nécessaires pour trancher ce débat.

Ce faisceau d'observations indique qu'un mécanisme complexe doit être à l'origine du champ magnétique terrestre. C'est finalement Joseph Larmor, professeur de l'université de Cambridge, qui trouva en 1919 la solution du problème. Il proposa pour la première fois un

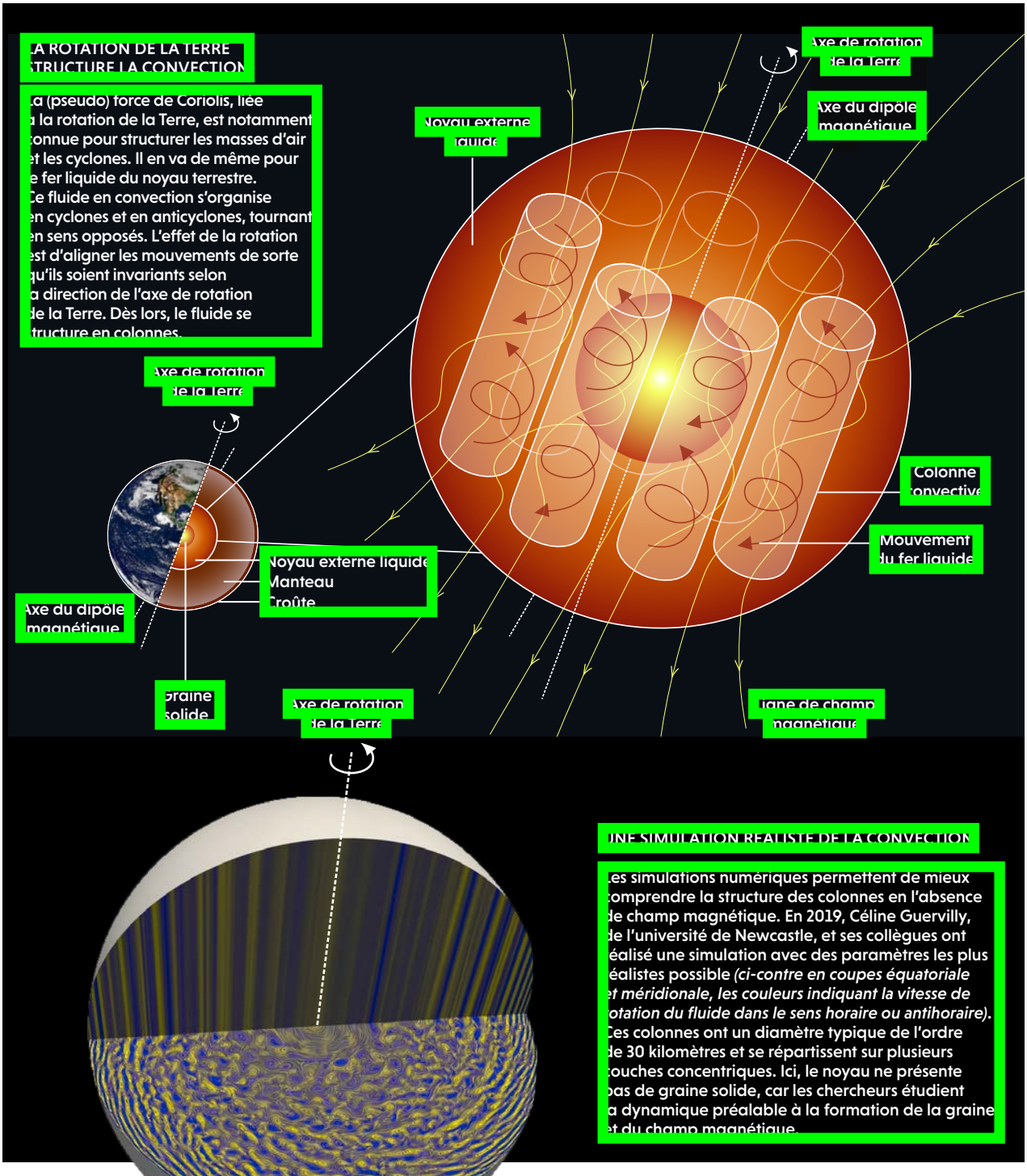
La dernière inversion date d'il y a 773 000 ans et la période de transition a duré quelques milliers d'années

DES COLONNES DE FER LIQUIDE AU CENTRE DE LA TERRE

Pour que la dynamo terrestre fonctionne, le fer liquide du noyau de la Terre doit être animé de mouvements. C'est le cas notamment grâce à la convection thermique : le liquide plus profond étant plus chaud, il est moins dense et tend donc à monter vers la surface, tandis que le fer plus froid plonge. La croissance de la graine solide, à mesure que le noyau se refroidit, contribue aussi aux mouvements de convection. Pour bien décrire la convection, il faut prendre en compte la rotation de la Terre sur elle-même, dont résulte une force inertielle, la force de Coriolis. On montre alors que les mouvements de convection du fer liquide se structurent en colonnes parallèles à l'axe de rotation de la planète. À mesure que le champ magnétique produit par l'effet dynamo s'intensifie, les forces associées entrent en compétition avec la force de Coriolis et détruisent la structure en colonnes.

LA ROTATION DE LA TERRE STRUCTURE LA CONVECTION

La (pseudo) force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre, est notamment connue pour structurer les masses d'air et les cyclones. Il en va de même pour le fer liquide du noyau terrestre. Ce fluide en convection s'organise en cyclones et en anticyclones, tournant en sens opposés. L'effet de la rotation est d'aligner les mouvements de sorte qu'ils soient invariants selon la direction de l'axe de rotation de la Terre. Dès lors, le fluide se structure en colonnes.



UNE SIMULATION RÉALISTE DE LA CONVECTION

Les simulations numériques permettent de mieux comprendre la structure des colonnes en l'absence de champ magnétique. En 2019, Céline Guervilly, de l'université de Newcastle, et ses collègues ont réalisé une simulation avec des paramètres les plus réalistes possible *(ci-contre en coupes équatoriale et méridionale, les couleurs indiquant la vitesse de rotation du fluide dans le sens horaire ou antihoraire)*. Ces colonnes ont un diamètre typique de l'ordre de 30 kilomètres et se répartissent sur plusieurs couches concentriques. Ici, le noyau ne présente pas de graine solide, car les chercheurs étudient la dynamique préalable à la formation de la graine et du champ magnétique.

mécanisme où une partie de l'énergie mécanique des mouvements d'un fluide conducteur d'électricité est convertie en énergie électrique et donc en champ magnétique. Son raisonnement ne fait appel à aucun aimant permanent pour engendrer les courants électriques et est novateur, car il repose sur une instabilité. L'idée est que l'interaction du fluide en mouvement avec un infime champ magnétique ou courant électrique fortuitement présent crée un courant électrique et un champ magnétique qui se renforcent et s'entretiennent mutuellement. C'est l'effet dynamo autoexcité (*voir l'encadré page 46*).

Larmor a d'abord appliqué son idée au Soleil, car l'existence de mouvements fluides en son sein était déjà connue au début du XXe siècle. Mais il a noté que ce mécanisme s'appliquerait aussi à la Terre si l'intérieur de celle-ci était fluide. À cette époque, grâce à l'étude des ondes sismiques, les géophysiciens avaient montré que la planète présentait un noyau distinct du manteau terrestre. Mais il a fallu attendre encore une dizaine d'années pour savoir qu'il est en partie liquide.

Lors de sa formation, la Terre s'est différenciée : le fer (plus dense) s'est accumulé au centre de la planète pour former le noyau, entouré d'un manteau rocheux (moins dense). À quelque 3 000 kilomètres sous nos pieds, ce noyau est constitué à 80 % de fer en fusion, mélangé à des éléments plus légers, principalement du nickel, l'ensemble étant à une température de plusieurs milliers de degrés. Du fait des pressions extrêmes, une « graine » solide, constituée de fer presque pur, s'est formée au centre du noyau. C'est de la partie liquide du noyau qu'émergerait l'effet dynamo.

UN BRASSAGE EFFICACE

Parce qu'elle se refroidit depuis sa surface, la Terre présente un gradient radial de température. Dès lors, le fer liquide au plus profond est plus chaud, et donc moins dense, que celui jouxtant le manteau. D'où la mise en place de mouvements de convection : la poussée d'Archimède entraîne le fer liquide chaud vers le haut et le fer liquide plus froid descend.

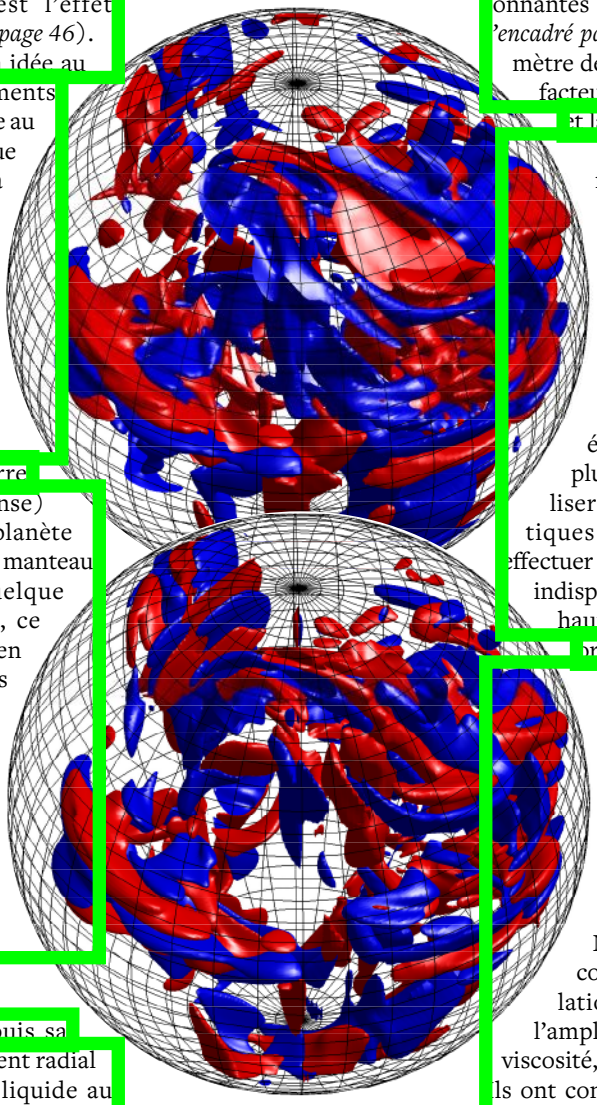
À cela s'ajoute une convection liée à la composition : avec le refroidissement de la planète, le rayon de la graine croît lentement ; le fer cristallise tandis que les éléments légers restent dans le noyau liquide, mais du fait de leur densité moindre, ils remontent vers le manteau et contribuent ainsi au mouvement de convection. Et la cristallisation de la graine libère de la chaleur, qui amplifie l'effet de convection thermique du noyau liquide.

La rotation de la Terre et la (pseudo) force de Coriolis qui lui est associée jouent aussi un rôle. En l'absence de champ magnétique, cette force contraint le fluide subissant la convection à s'organiser en cyclones et anticyclones, et s'oppose à toute variation de la vitesse dans la direction de l'axe de rotation de la planète. Le fluide se structure alors en colonnes tourbillonnantes parallèles à l'axe de rotation (*voir l'encadré page ci-contre*). Le nombre et le diamètre de ces colonnes dépendent de divers facteurs comme la viscosité du fer liquide et la vigueur des mouvements.

Les chercheurs utilisent notamment des simulations numériques pour étudier la dynamo terrestre. Mais les caractéristiques de la Terre rendent difficiles la résolution de modèles réalistes. Quand certains paramètres sans dimension sont petits, les effets de certains termes sur l'écoulement apparaissent à de toutes petites échelles. Cette finesse implique une plus grande quantité de calculs à réaliser et donc des ressources informatiques plus puissantes pour espérer effectuer des simulations réalistes. Il est alors indispensable de faire appel à du calcul de haute performance, c'est-à-dire à des ordinateurs massivement parallèles.

Par exemple, on pensait que le diamètre des colonnes de convection dépendait surtout de la viscosité du fluide et était de l'ordre de la dizaine de mètres de diamètre, à comparer au diamètre de plusieurs milliers de kilomètres du noyau. Mais, en 2019, Céline Guervilly, de l'université de Newcastle, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré à l'aide de simulations numériques que c'est plutôt l'amplitude des mouvements, et non la viscosité, qui fixe l'échelle de ces colonnes. Ils ont conclu que le diamètre des colonnes était plutôt de l'ordre de 30 kilomètres (*voir la figure en bas de l'encadré page ci-contre*). Ce résultat réduit le problème des échelles et ouvre la perspective de concevoir des modèles plus réalistes et moins gourmands en ressources de calcul.

Néanmoins, malgré des ordinateurs toujours plus performants, les paramètres des simulations restent assez éloignés de ceux du noyau fluide de la Terre. Les chercheurs essaient toutefois de déduire de leurs modèles certaines caractéristiques robustes du champ



Une fois la dynamo enclenchée, le fer liquide du noyau est soumis à la force de Laplace et celle de Coriolis. Ces simulations de l'auteur montrent comment les deux forces s'équilibrent. La force de Coriolis s'exerçant sur le fer liquide (*en haut*) est représentée en isocontours (*en rouge pour une valeur positive, en bleu pour une valeur négative*) ; elle tend à s'équilibrer avec la force de Laplace (*en bas*).

magnétique et malgré tout de s'approcher d'un régime le plus réaliste possible.

Ces simulations numériques ont mis en évidence la possibilité d'enclencher l'effet dynamo dans des modèles du noyau liquide terrestre. Tous les éléments de la théorie de Larmor semblent donc réunis. Et une fois que l'effet dynamo s'enclenche, l'intensité du champ magnétique augmente jusqu'à ce que la force – dite « de Laplace » – que ce champ exerce sur le fluide conducteur rivalise avec la force de Coriolis. On atteint, alors, un régime d'équilibre où le champ magnétique compense les contraintes de la rotation rapide : les colonnes de convection disparaissent, comme on l'observe dans mes simulations de 2016 (*voir les figures page 45*).

UN SYSTÈME NON LINÉAIRE

Ce type de simulations s'appuie sur des équations que l'on résout par des méthodes numériques, donc par des méthodes d'approximation. L'étude rigoureuse de ces équations est aussi un défi pour les mathématiciens. Leur analyse commence au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, lorsque le physicien d'origine allemande Walter Elsasser en a donné l'expression moderne sous la forme d'un système d'équations magnétohydrodynamiques qui décrivent l'instabilité proposée par Larmor. Le système comprend trois équations : l'équation de Navier-Stokes (intrinsèquement non linéaire), qui régit le mouvement du fluide, l'équation d'induction du champ magnétique, qui décrit la formation du champ magnétique et les effets de l'induction, et une troisième équation, qui porte sur les transferts thermiques au sein du fluide. Le système de ces trois équations est difficile à résoudre, car il est non linéaire – notamment parce que le mouvement du fluide donne naissance au champ magnétique, qui agit en retour, par la force de Laplace, sur l'écoulement du fer liquide.

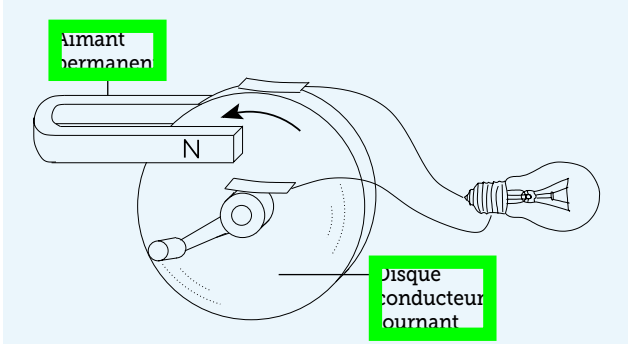
Comme pour les simulations numériques, la difficulté de résolution de ces équations réside en partie dans les valeurs prises par leurs paramètres, associées à des caractéristiques, parfois extrêmes, de la Terre. Par exemple, la force de Coriolis est plusieurs milliards de fois plus intense que celles liées à la

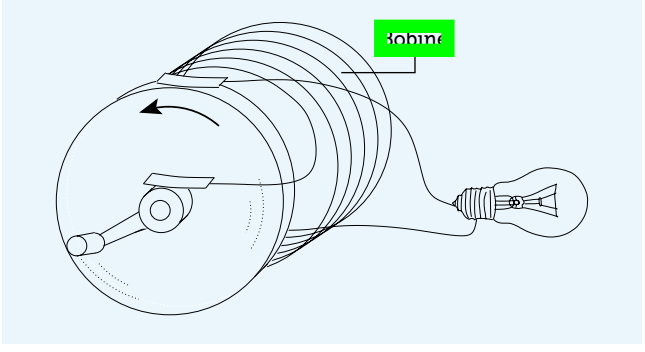
L'EFFET DYNAMO AUTOEXCITÉ : LE RÔLE DE L'INSTABILITÉ

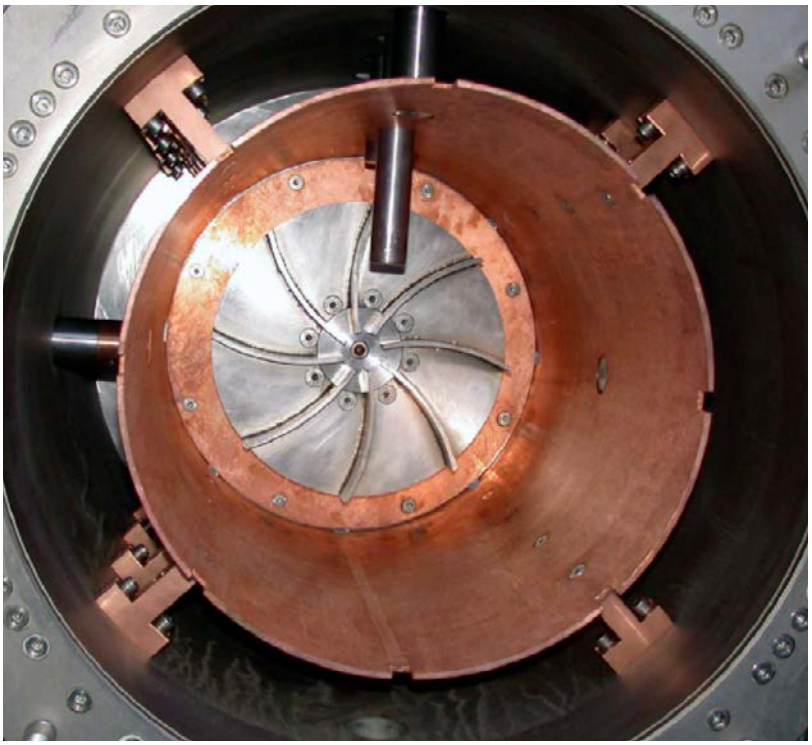
Dans une dynamo de vélo, le mouvement de la roue entraîne un aimant permanent dans un bobinage. D'après les lois de l'électromagnétisme, les variations du champ magnétique créent un courant électrique dans la bobine. Dans un dispositif équivalent *(ci-dessous, à gauche)*, le courant est produit grâce au mouvement d'un disque conducteur tournant dans un champ magnétique fixe. Mais comment produire un courant électrique sans aimant permanent, comme cela semble être le cas pour la Terre ? Joseph Larmor a proposé une solution en 1919 : l'effet dynamo autoexcité. Pour illustrer l'idée, reprenons le dispositif précédent et remplaçons l'aimant par une bobine. Lorsqu'un courant circule dans la bobine, il crée un champ magnétique qui peut jouer le rôle de l'aimant du montage précédent. Dès lors, on obtient une dynamo ; un courant électrique est produit et, si le bobinage s'enroule dans le bon sens, ce courant créera à son tour un champ magnétique qui viendra renforcer le champ initial, etc. C'est par une telle amplification qu'on obtiendrait un champ magnétique à l'échelle d'une planète !

Mais une question se pose, celle dite « de l'œuf et de la poule » : lequel, du champ magnétique ou du courant électrique, était là en premier ? Il s'agit en fait d'une fausse question. Au-delà d'une certaine vitesse de rotation du disque conducteur, tout courant ou champ magnétique, aussi petit soit-il, pourvu qu'il soit non nul, sera amplifié. C'est ce que l'on nomme une instabilité. Divers phénomènes ou sources extérieures au dispositif peuvent provoquer cet élément déclencheur (effet thermoélectrique, source externe de champ magnétique, etc.).

Un exemple plus familier d'instabilité est l'« effet Larsen ». Au-delà d'une certaine amplification, un son, aussi petit soit-il, pourvu qu'il soit non nul, est capté par le micro, amplifié par le haut-parleur et croît jusqu'à devenir strident. L'origine du son initial n'a pas d'importance : au-delà d'une certaine amplification, l'effet est systématique







En 2006, l'expérience *VKS* (pour *Von Karman sodium*), à Cadarache, en France, a reproduit l'effet dynamo autoexcité. Le fluide, du sodium liquide, était brassé dans un cylindre par deux disques munis de pales *(au fond, en gris)* et mis en rotation à ses extrémités, les deux disques tournant en sens inverses. En faisant tourner les deux disques à des vitesses différentes, les chercheurs ont observé pour la première fois le phénomène d'inversion du champ magnétique.

viscosité du fluide. De telles différences d'échelles se retrouvent aussi dans l'évolution temporelle : la rotation propre de la Terre, sur vingt-quatre heures, influe de façon évidente sur la génération du champ géomagnétique (en conférant à celui-ci sa structure principalement dipolaire alignée en moyenne sur l'axe de rotation de la planète), mais l'évolution du champ magnétique présente des temps caractéristiques qui s'expriment plutôt en siècles, voire plus (comme pour les inversions de polarité). Ces différences d'échelle rendent très difficile l'étude de ces équations.

DES EQUATIONS RAIDES

Si l'on néglige, en première approximation, tous les petits paramètres (des rapports adimensionnels plus petits que le millionième), on obtient des équations simplifiées, mais que l'on ne sait en général pas résoudre à l'heure actuelle. On n'a même pas démontré, pour ces équations, l'existence de solutions « régulières » (c'est-à-dire physiquement acceptables et non aberrantes, exemptes par exemple d'oscillations infiniment rapides). Obtenir la solution dans cette limite négligeant les petits paramètres, nommée « état de Taylor » (introduite en 1963 par le physicien britannique John Bryan Taylor), constitue aujourd'hui encore un formidable défi mathématique.

En 2015, Paul Roberts et Cheng-Chin Wu, de l'université de Californie à Los Angeles, ont réalisé les premiers modèles numériques pour l'état de Taylor, et dans une configuration simplifiée. En 2017, Isabelle Gallagher, de l'École normale supérieure, à Paris, et David Gérard-Varet, de l'université Paris-Diderot, ont étudié la régularité mathématique d'un cas particulier de l'état de Taylor où les équations non linéaires sont prises dans une limite linéarisée et dans une géométrie idéalisée.

De façon surprenante, en réintroduisant les petits paramètres que l'on avait négligés (on parle de développement asymptotique), on peut obtenir des solutions. Mais les équations restent particulièrement difficiles à étudier (on parle de systèmes raides).

En 2015, Michael Calkins, de l'université du Colorado à Boulder, aux États-Unis, et une équipe internationale ont combiné l'approche asymptotique avec l'approche numérique, dans le cas où le champ magnétique est assez faible. En 2016, j'ai développé une simulation de dynamo à champ fort (c'est-à-dire pour lesquelles le champ magnétique s'équilibre avec la force de Coriolis), évoquée précédemment. Diverses équipes dans le monde se livrent toujours à une course aux paramètres le plus réalistes possible.

Une autre approche repose sur la démonstration expérimentale de l'effet dynamo autoexcité. La tâche est complexe, car elle nécessite de mettre en mouvement de gros volumes de métaux liquides ; en effet, pour de petits volumes, la dissipation des courants électriques est trop efficace pour être compensée par le mouvement du fluide. À ce jour, seules trois expériences ont reproduit l'effet dynamo autoexcité dans un fluide conducteur en laboratoire.

UNE DYNAMO EN LABORATOIRE

Les deux premières ont fonctionné à quelques mois d'écart en 1999 en Allemagne, à Karlsruhe, et en Lettonie, à Riga. Dans les deux cas, l'écoulement d'un métal liquide (du sodium, qui fond juste en dessous de 100 °C) était fortement contraint à l'aide de tuyaux. Les géométries de ces écoulements ont été choisies pour s'approcher d'écoulements connus analytiquement dont on connaissait les propriétés dynamo. Ces deux premières expériences ont confirmé que le mécanisme de Larmor est réalisable. Les champs magnétiques produits ont augmenté jusqu'à ce que la force de Laplace freine assez l'écoulement pour cesser leur amplification. Ces expériences n'exhibaient cependant pas d'inversions, car la géométrie des écoulements était trop contrainte.

En 2006, la troisième expérience, nommée *VKS* et réalisée en France, à Cadarache, a permis d'obtenir l'effet dynamo autoexcité dans un écoulement turbulent peu contraint. Le sodium liquide était brassé dans une cavité

LA TERRE PERD-ELLE LE NORD ?

En pinçant légèrement la nappe, la bille peut rouler assez loin. C'est un phénomène équivalent qui explique pourquoi le pôle nord magnétique se déplace si vite.

Le champ magnétique sert depuis longtemps de référence. Les boussoles que nous utilisons pour nous orienter n'indiquent-elles pas immanquablement le Nord, ou du moins une zone proche du pôle Nord géographique ? À ce titre, on pourrait penser que le champ magnétique est stationnaire et immuable. Pourtant, il n'est ni immuable ni stationnaire.

Les registres géologiques ont ainsi montré que l'orientation du champ magnétique s'est souvent inversée au cours de l'histoire de la Terre. Le champ magnétique s'est donc retrouvé la tête en bas. Mais sans aller jusqu'à une situation aussi radicale, le pôle nord magnétique n'est pas immobile et se déplace. Ces vingt dernières années, il a ainsi migré sur plusieurs centaines de kilomètres. Ce phénomène est parfaitement normal.

Pour offrir des cartes précises du champ magnétique, même près du pôle Nord, le modèle magnétique mondial (WMM), qui est d'habitude revu tous les cinq ans, a eu droit à une mise à jour anticipée d'un an en 2019. Y a-t-il lieu de s'inquiéter que le pôle nord magnétique se déplace actuellement à une vitesse d'environ 55 kilomètres par an, contre moins de 10 kilomètres par an il y a cinquante ans ? Cette accélération est-elle le signe d'un phénomène exceptionnel en train de se produire dans le noyau terrestre ? Faut-il craindre une inversion imminente de la polarité du champ magnétique ? Il n'en est rien.

La Terre présente trois « pôles nord » distincts. Le premier, le « pôle Nord géographique », indique la position de l'axe de rotation de la planète. Le deuxième, le « pôle nord géomagnétique », indique la position du grand aimant dipolaire qui caractérise en première approximation le champ magnétique terrestre. Proche du pôle géographique (ce qui confère à la boussole son utilité), il est, par construction, à l'antipode du pôle sud géomagnétique. Le troisième pôle est le « pôle nord magnétique ». C'est le lieu où l'aiguille d'une boussole, libre de s'orienter selon ses trois axes, se tiendrait parfaitement verticale, comme pour indiquer : « C'est ici ! ».

> Le pôle nord magnétique se déplace actuellement à une vitesse d'environ 55 kilomètres par an

Evidemment, le pôle magnétique prend en compte toute la complexité du champ, lequel a des composantes « multipolaires » qui le différencient d'un simple dipôle. Le pôle nord magnétique et le pôle sud magnétique n'ont donc aucune raison d'être exactement à l'antipode l'un de l'autre.

C'est ce dernier pôle, le pôle magnétique, qui fait parler de lui. S'il est vrai que ses mouvements sont complexes et difficiles à anticiper, ils se restreignent à un bassin bien délimité près du pôle géographique (*voir ci-dessous*). Sur une vaste zone (*en bleu clair*), le champ magnétique est quasiment vertical. Le pôle nord magnétique (*cercle rouge*) s'est rapidement déplacé entre 2000 et 2019, mais on note que la tache claire s'est, en revanche, peu déplacée, tout comme le pôle nord géomagnétique (*carré rouge*).

Le pôle nord magnétique est peu contraint. De toutes petites variations du champ engendrent donc un grand déplacement de celui-ci. Un phénomène analogue à celui d'une bille posée sur une nappe : en soulevant à peine la nappe (*voir ci-dessus*), la bille roule loin.

La structure du champ magnétique au pôle Sud apparaît plus contrainte et limite la dérive du pôle sud magnétique. Il se déplace tranquillement à moins de 10 kilomètres par an, sans aucun signe d'accélération. Il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter d'une inversion imminente !

Les mouvements rapides du pôle nord magnétique ne sont pas pour autant sans intérêt. Ils nous informent sur la dynamique du champ magnétique et sur les mouvements du fer liquide au sein du noyau terrestre.

cylindrique par deux disques situés à chaque extrémité et tournant en sens contraires (*voir la photographie page 47*). Cette expérience a permis, pour la première fois, d'observer en laboratoire des inversions spontanées de polarité et de mieux comprendre comment elles se déroulent à l'échelle de la planète.

Les équations d'Elsasser montrent que ce changement de polarité est possible : si un écoulement peut maintenir un champ magnétique d'une polarité donnée, il peut, sans être modifié, maintenir aussi le champ de polarité opposé ! En revanche, la question de la transition entre les polarités est longtemps restée mystérieuse. L'expérience *VKS* a permis de mettre en évidence le rôle des symétries : le champ magnétique engendré par les deux disques contrarotatifs ne s'inverse que si la symétrie de l'écoulement est brisée, c'est-à-dire si les deux disques ne tournent pas à la même vitesse.

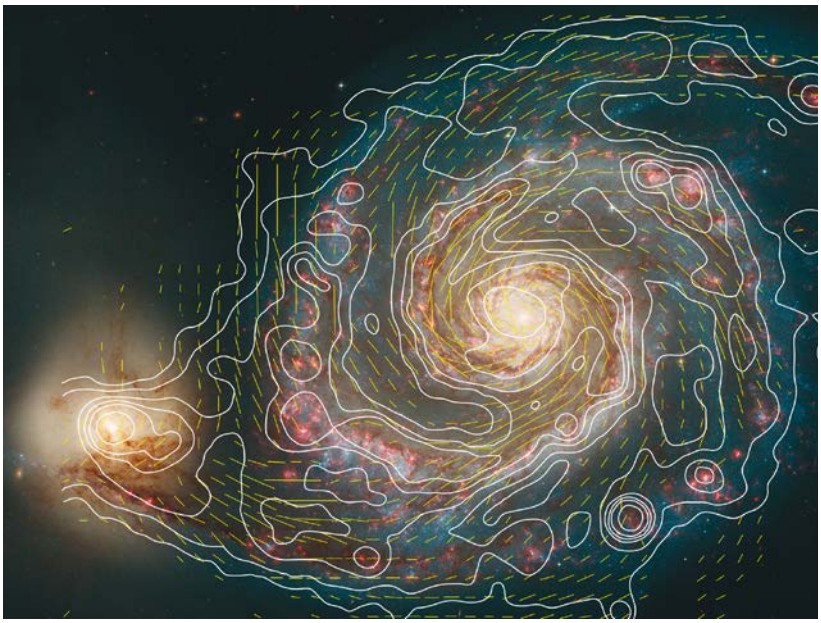
En 2009, François Pétrélis, de l'Ecole normale supérieure, à Paris, et trois collègues, dont je faisais partie, ont modélisé la dynamique de l'inversion sur un système de basse dimension (impliquant peu de degrés de liberté). Nous avons pu modéliser les aspects essentiels de l'inversion du champ magnétique terrestre : une décroissance lente de l'intensité du champ (qui ne disparaît cependant pas complètement, mais devient chaotique) suivie d'une inversion rapide de la polarité, et enfin un rétablissement rapide de l'intensité. Les tout récents travaux de Brad Singer sur les registres géologiques, évoqués précédemment, ont confirmé ce scénario pour la dernière inversion du champ géomagnétique.

DES DEFIS TECHNIQUES

Dans l'expérience *VKS*, les disques tournants qui produisent l'écoulement étaient en fer. Or ce matériau peut s'aimanter, ce qui pourrait contribuer à la génération du champ magnétique, et donc fausser les mesures. Plusieurs équipes essaient à présent de réaliser des expériences dans des géométries plus proches de celle de la Terre et sans utiliser de fer.

C'est le cas de Daniel Lathrop, de l'université du Maryland, qui a mené un projet reposant sur une enceinte sphérique de 3 mètres de diamètre en rotation. Mais en raison des difficultés techniques, il n'y a pas eu de résultats. Cary Forest, de l'université du Wisconsin, à Madison, élabore une expérience utilisant un plasma plutôt qu'un métal liquide. Enfin, à Dresde, la plateforme Dresdyn (*Dresden sodium facility for dynamo and thermohydraulic studies*) permettra d'étudier plusieurs configurations, dont une dynamo de 2 mètres de diamètre forcée par les mouvements de précession.

Ces expériences encore en développement devraient, dans les années à venir, aider à mieux comprendre le phénomène de dynamo



Le champ magnétique d'une galaxie polarise la lumière provenant de celle-ci ou de sources plus lointaines. En analysant cette lumière, il est alors possible de cartographier le champ magnétique, comme ici pour la galaxie M51.

BIBLIOGRAPHIE

K. Moffatt et E. Dormy, **Self-Exciting Fluid Dynamos**, Cambridge University Press, 2019.

C. Guervilly *et al.*, **Turbulent convective length scale in planetary cores**, *Nature*, vol. 570, pp. 368-371, 2019.

N. Schaeffer *et al.*, **Turbulent geodynamo simulations : a leap towards Earth's core**, *Geophysical Journal International*, vol. 211(1), pp. 1-29, 2017.

E. Dormy, **Strong-field spherical dynamos**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 789, pp. 500-513, 2016.

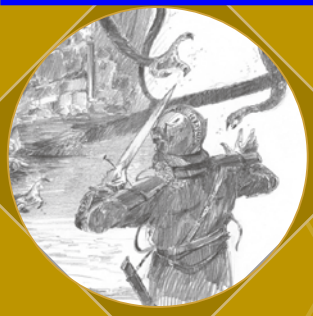
E. Dormy, **The origin of the Earth's magnetic field : fundamental or environmental research ?**, *Europhysics news*, vol. 37(2), pp. 22-25, 2006.

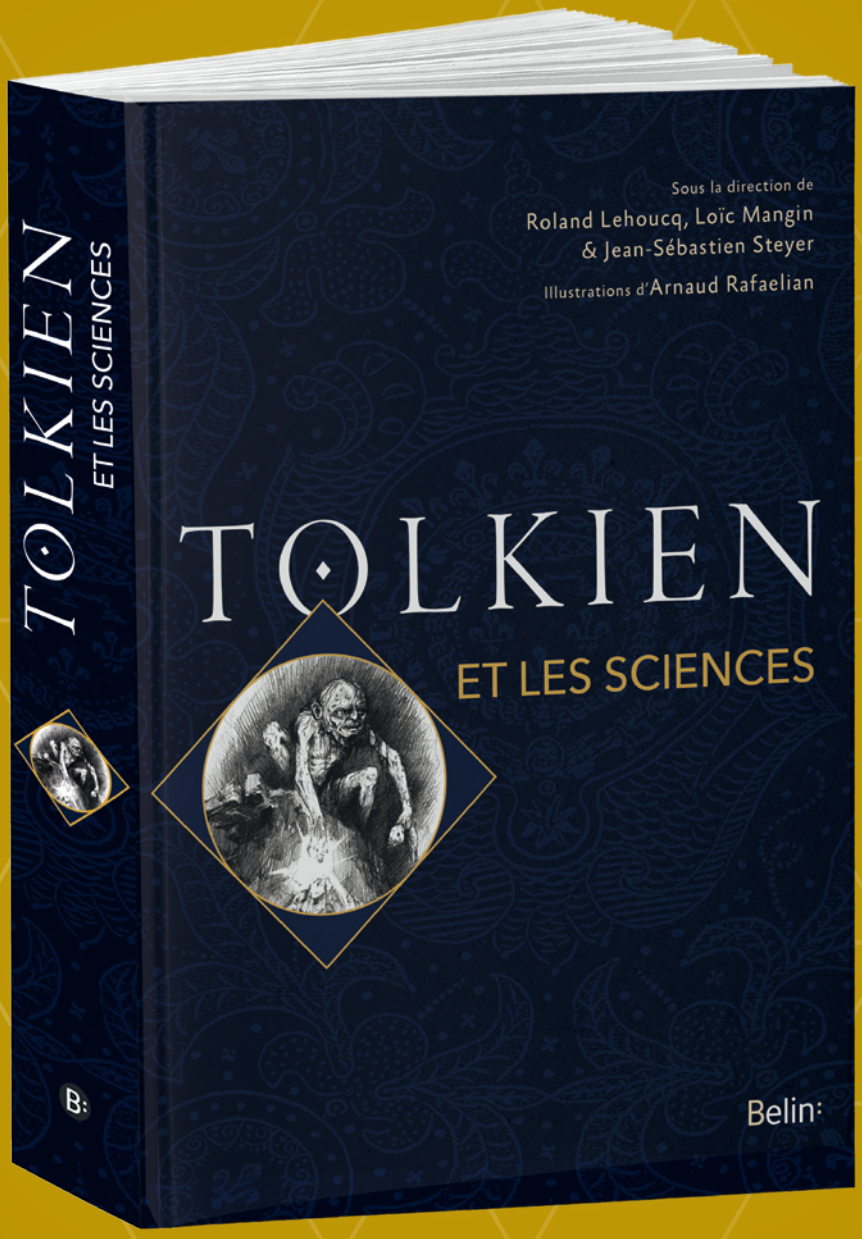
autoexcité. L'enjeu ne se limite pas au géomagnétisme. Dans son article de 1919, Larmor s'était avant tout intéressé au champ magnétique du Soleil. L'étoile, dont le diamètre est cent fois plus grand que celui de la Terre, produit aussi un champ magnétique organisé. L'intensité de son champ de grande échelle est assez comparable à celle du champ terrestre (environ 10 gauss pour l'étoile et 0,5 gauss pour la planète), sauf dans les régions des taches solaires, où il peut atteindre plusieurs milliers de gauss. Autre différence, la polarité du champ magnétique solaire s'inverse de façon quasi périodique tous les onze ans. En fait, une grande partie des objets astrophysiques produisent un champ magnétique. C'est le cas de la plupart des planètes du Système solaire, mais pas toutes (Vénus, par exemple, n'a pas de champ magnétique).

DES DYNAMOS GALACTIQUES

Les galaxies produisent aussi un champ magnétique (*voir la figure ci-dessus*) de l'ordre du microgauss (un million de fois moins que le champ terrestre). Là encore, l'effet dynamo est la seule explication pour l'origine de ce champ organisé à grande échelle. Il prend sa source dans les mouvements du milieu interstellaire liés à la rotation de la galaxie et aux chocs provoqués par les explosions de supernovæ. L'étude des différents champs magnétiques n'est pas simple, car ils interagissent les uns avec les autres. Ainsi, le vent solaire interagissant avec la magnétosphère terrestre produit les spectaculaires aurores boréales. En cent ans, les chercheurs ont compris plusieurs aspects de la dynamo terrestre, mais il reste des questions ouvertes, sur Terre comme ailleurs dans l'Univers... ■

QUAND LA SCIENCE
NOUS ÉMERVEILLE...





Belin:

LES MÉCANISMES DE LA DÉSINFORMATION

COMMENT LES DÉMONTER

P. 52 Connaître l'ennemi : les rouages de la désinformation
P. 60 Comment enrayer une épidémie de désinformation ?
P. 68 Enseigner l'esprit critique

L'informatique et les technologies de la communication nous ont fait entrer dans l'« ère de l'information ». Mais est-ce vraiment le cas ? L'arrivée d'internet et de ses « réseaux sociaux » a ouvert aux campagnes de désinformation des moyens nouveaux et beaucoup plus puissants qu'auparavant. On assiste ainsi à la diffusion massive et rapide d'informations délibérément ou involontairement fausses. Ce qui a de lourdes conséquences sociales, politiques, économiques, sanitaires… Lutter contre ce phénomène nécessite d'abord de bien comprendre ses mécanismes. C'est à cette condition que l'on trouvera des parades efficaces – dont l'enseignement de l'esprit critique, insuffisamment pratiqué, est l'un des éléments essentiels.

Pour la Science

L'ESSENTIEL

- La désinformation sur internet s'effectue par la diffusion d'informations délibérément fausses, de vidéos trafiquées, de mèmes…
- Avec l'automatisation d'actions et le ciblage fin des internautes, des agents malveillants instrumentalisent aisément les usagers des réseaux sociaux, à des fins diverses : influence politique, gain d'argent, pure malveillance…
- Beaucoup de recherches restent à mener pour mieux comprendre les effets de la désinformation et construire les garde-fous nécessaires pour s'en protéger.

L'AUTRICE

CLAIRE WARDLE
Chercheuse en communication, cofondatrice et directrice de First Draft, une organisation internationale à but non lucratif créée en 2015 pour étudier la désinformation et la combattre

Connaître l'ennemi: les rouages de la désinformation

Sur les réseaux sociaux, des agents malveillants exploitent notre propension à relayer sans réfléchir des contenus. Ils manipulent nos opinions soit en propageant des informations fausses ou au contexte dénaturé, soit en propageant des mèmes, c'est-à-dire des messages – visuels le plus souvent – spécialement conçus pour être partagés très vite.

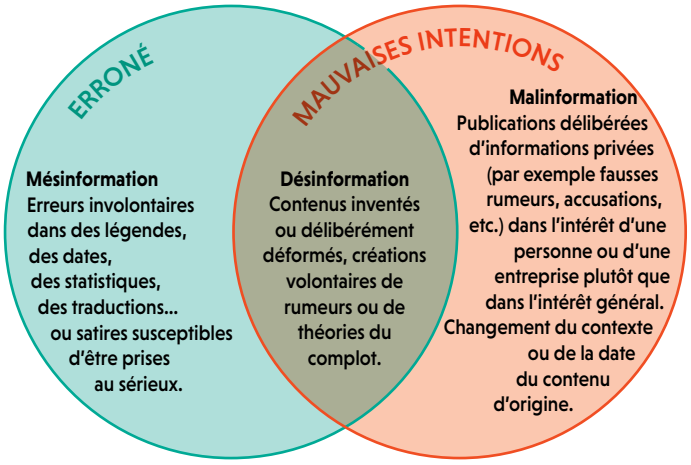
J'étudie l'impact de la désinformation sur la société. Cela m'amène souvent à regretter que les jeunes entrepreneurs de la Silicon Valley ayant rendu possible la communication rapide d'aujourd'hui n'aient pas été obligés, avant de commercialiser leurs technologies, de simuler un scénario du type de l'attaque des tours jumelles de New York le 11 septembre 2001.

L'une des images les plus frappantes de cet événement montre un groupe de New-Yorkais le regard tourné vers le ciel. Sa puissance tient au fait que nous savons à quelle horreur ils assistaient. Il semble évident que, aujourd'hui, tous ou presque auraient un smartphone à la main, certains filmant le terrible spectacle afin de publier aussitôt leur vidéo sur Twitter et sur Facebook. Alimentées par les réseaux sociaux en ligne, les rumeurs et les informations fausses se répandraient vite; les messages haineux envers les musulmans se multiplieraient; avec les innombrables partages, « J'aime » et autres commentaires, les algorithmes renforceraient les spéculations et l'indignation, tandis que, de l'étranger, des agents de désinformation amplifieraient le chaos en semant la zizanie entre communautés. Pendant ce temps, les personnes bloquées en haut des tours suivraient en direct sur leur téléphone leurs derniers instants…

Tester les technologies des réseaux sociaux dans les conditions réelles des pires événements historiques aurait peut-être mis en évidence ce que les sociologues et les propagandistes savent depuis longtemps: les humains réagissent aux signaux émotionnels et partagent de fausses informations lorsqu'elles renforcent leurs croyances et leurs préjugés. Au lieu de cela, les développeurs des réseaux sociaux en ligne ont cru avec ferveur que créer un grand nombre de connexions entre les gens favoriserait la tolérance et neutraliserait la haine. Ils n'ont pas su voir qu'en elle-même, la technologie ne peut rien changer à ce que nous sommes fondamentalement – elle ne peut que prolonger et amplifier les traits humains existants.

TROIS CATÉGORIES DE TROUBLES INFORMATIONNELS

Un langage commun est impératif pour étudier et comprendre l'écosystème informationnel, car le recours habituel à des expressions simplistes telles que *fake news* (qui signifie « nouvelles de presse contrefaites ») efface des [illegible] vrai » par rapport à ce qui serait « faux », alors que les troubles informationnels découlent de tromperies qui se déclinent dans de nombreuses nuances.



La mésinformation en ligne existe depuis le milieu des années 1990. Mais en 2016, plusieurs événements ont mis en évidence l'émergence de forces plus malveillantes encore : l'automatisation, le microciblage et la coordination alimentaient désormais des campagnes visant clairement à manipuler à grande échelle l'opinion publique. Lorsque Rodrigo Duterte parvint à se hisser au pouvoir grâce à une intense activité sur Facebook, les journalistes philippins ont agité le chiffon rouge. Cet événement fut suivi en juin par le résultat inattendu du Brexit, et en novembre par celui de l'élection présidentielle aux États-Unis. Ces développements successifs ont incité les chercheurs à étudier systématiquement de quelle façon l'information pouvait servir d'arme.

Au cours des trois dernières années, la discussion sur les causes de la pollution de nos écosystèmes d'information s'est surtout concentrée sur les mesures prises (ou pas) par les grandes entreprises d'internet. Cette fixation est trop simpliste : une imbrication complexe de changements sociaux rend les gens plus vulnérables qu'auparavant à la désinformation et aux théories du complot. La confiance dans les institutions s'érode en effet en raison de bouleversements politiques et économiques. L'aggravation incessante des inégalités de revenus en est l'un des principaux facteurs ; par ailleurs, les effets du changement climatique sont de plus en plus prononcés ; d'amples mouvements migratoires suscitent des tensions entre communautés ; et avec l'automatisation croissante, les gens ont de plus en plus peur pour leur emploi et pour leur vie privée.

Bien au fait de ces tendances sociétales, des acteurs souhaitant accroître les tensions existantes conçoivent des contenus qui, espèrent-ils, susciteront la colère ou l'enthousiasme de leurs destinataires afin de transformer ceux-ci en messagers. L'objectif poursuivi est d'exploiter le capital social de chaque destinataire afin de renforcer les messages diffusés et d'augmenter la crédibilité de ces derniers.

La plupart de ces contenus ne sont pas conçus pour convaincre les gens de quoi que ce soit, mais pour créer de la confusion, bouleverser et saper la confiance dans les institutions démocratiques, depuis le système électoral jusqu'à la presse. Même si une intense activité de ce genre est en cours afin de préparer l'électorat américain en vue de la course à la présidence de 2020, les contenus trompeurs et conspirationnistes ne datent pas de la campagne présidentielle de 2016 et ne prendront pas fin avec celle qui vient. Car à mesure que les outils logiciels conçus pour manipuler et amplifier les contenus deviennent moins chers et plus accessibles, il est de plus en plus facile d'instrumentaliser les utilisateurs de réseaux sociaux et d'en faire, à leur insu, des agents de la désinformation.

« FAKE NEWS », UNE EXPRESSION FOURRE-TOUT ET SANS NUANCES

Le langage utilisé en général pour discuter du problème de la désinformation est trop simpliste. Tant la recherche que la détermination d'actions à mener exigent de partir de définitions claires. Or beaucoup de gens emploient l'expression problématique de *fake news*, qui se traduit au mieux par « fausses nouvelles ». Sans cesse brandie par des politiciens du monde entier pour attaquer la presse indépendante, cette expression est dangereuse. Des travaux récents montrent que le public l'associe de plus en plus à la presse traditionnelle. Cette expression fourre-tout se rapporte à plusieurs phénomènes distincts : mensonges, rumeurs, canulars, désinformation, complots, propagande... *Fake news* masque ainsi les nuances et la complexité de ces types de contenus, lesquels n'ont rien de nouvelles de presse, mais consistent en mèmes, vidéos et messages publiés sur les réseaux sociaux tels que Facebook et Instagram.

Afin de faire apparaître la diversité des contenus susceptibles de polluer l'écosystème informationnel, j'ai défini en février 2017 sept catégories différentes de « troubles de l'information ». Elles comportent notamment la

L'AVENIR DE LA « POST-VÉRITÉ »

Les faits sont-ils devenus moins fiables que le ressenti personnel et les opinions subjectives de chacun ? C'est en tout cas cet état d'esprit que désigne l'expression « post-vérité », le célèbre « mot de l'année » 2016. Un régime de post-vérité impliquerait qu'une certaine attitude marquée par l'indifférence, ou même l'hostilité, à l'égard de la vérité ait atteint une masse critique telle que l'information authentique ne pourrait tout simplement plus circuler.

Il est cependant difficile d'imaginer un monde où la distinction entre le vrai et le faux serait entièrement caduque : après tout, pour que le faux fasse sa besogne, il doit tout de même se faire passer pour le vrai, un peu comme la fausse monnaie n'a d'utilité que s'il existe encore de la vraie monnaie. La question posée par la notion de post-vérité est donc celle des rapports que nous entretenons avec la vérité et la valeur que nous lui accordons, plutôt que celle de sa disparition pure et simple.

Partant de ce constat, un champ de recherche pluridisciplinaire très dynamique s'est développé ces dernières années pour explorer l'ampleur, les fondements et les conséquences de la désaffection contemporaine pour les faits objectifs. Le tableau qui en ressort est à la fois complexe et encourageant.

Nombre de facteurs cognitifs, émotionnels, sociologiques, culturels, historiques, médiatiques, politiques et technologiques ont été mis au jour, qui permettent de mieux saisir la mécanique de la post-vérité. Il est ainsi impossible aujourd'hui de simplement mettre en accusation les « réseaux sociaux », le « populisme », les « biais cognitifs » ou les « inégalités » en ignorant les riches interactions de ces phénomènes et la façon dont les pourvoyeurs de désinformation les exploitent.

En retour, ces nouvelles connaissances offrent des solutions ciblées pour contrecarrer l'extension de la post-vérité. Sur la question du changement climatique, par exemple, on sait que la désinformation s'est longtemps concentrée sur la mise en doute du consensus scientifique, en créant de la confusion et en donnant l'illusion d'une « controverse ». Plusieurs études récentes montrent qu'il est possible de reprendre la main sur cette intoxication – notamment en rappelant simplement et fréquemment le fait que 97 % des experts sur le sujet s'accordent sur la nature anthropogénique du problème.

Au-delà du développement de méthodes de communication effectives, les modèles mathématiques de diffusion de l'information sur les multiples plateformes en ligne offrent des pistes plus agressives. Une étude récente, par exemple, indique que la haine s'agrège à travers les langues et les frontières en un « réseau de réseaux » très résilient. Bannir les plus grands groupes n'a pour effet que de les dissoudre en de multiples sous-groupes qui ne tardent pas à regrossir et se réassembler ailleurs. Les simulations montrent qu'il est plus efficace de s'attaquer « par le bas » à cette nébuleuse, c'est-à-dire en éliminant les petits groupes ou en bannissant un petit nombre de membres aléatoirement et temporairement, ce qui a pour effet de miner les propriétés autoorganisatrices des producteurs de haine.

Le combat contre la post-vérité est donc pris très au sérieux par les scientifiques, avec l'ambition de proposer des solutions rigoureuses qui résistent à l'épreuve des faits.

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

satire, qui n'est pas destinée à faire du tort, mais qui a tout de même le potentiel de tromper ; le contenu inventé, qui est faux à 100 % et conçu pour tromper et causer du tort ; le faux contexte, c'est-à-dire l'association d'un contenu authentique avec des informations contextuelles fausses. Un peu plus tard au cours de l'année 2017 et en collaboration avec Hossein Derakhshan, journaliste spécialisé en technologie, j'ai aussi publié un rapport explicitant les différences entre mésinformation, désinformation et malinformation.

Pour les pourvoyeurs de *dés*information, c'est-à-dire de contenus délibérément fallacieux conçus afin de nuire, il y a trois objectifs possibles : gagner de l'argent ; exercer une influence politique, dans leur pays ou à l'étranger ; susciter des troubles par simple désir d'en provoquer.

DÉSINFORMATION, MÉSINFORMATION OU MALINFORMATION ?

Ceux qui propagent de la *més*information, c'est-à-dire du contenu faux relayé par une personne qui ne se rend pas compte que ce contenu est faux ou trompeur, sont pilotés par des facteurs sociopsychologiques. Ils mettent en scène leur identité sur les plateformes sociales afin de se sentir connectés aux autres, que ces « autres » soient un parti politique, une mouvance de parents opposés à la vaccination de leurs enfants, des activistes de la question climatique, des membres d'un groupe religieux ou ethnique… Il est important de noter que la désinformation se transforme en mésinformation lorsque les gens relayent des contenus de désinformation sans se rendre compte que ces informations sont fausses.

Nous avons introduit le terme de *mal*information pour qualifier des informations exactes communiquées dans l'intention de nuire. Ce fut par exemple le cas quand des agents russes ont piraté les boîtes de courriels du Comité national des démocrates et celle de Hillary Clinton, puis ont rendu publics certains détails gênants afin de nuire à la candidature Clinton à l'élection présidentielle de 2016.

Après avoir suivi de près les processus de mésinformation au cours de huit campagnes électorales menées à travers le monde depuis 2016, j'ai constaté un changement dans les tactiques et les techniques utilisées. La désinformation la plus efficace a toujours été celle qui contient une part de vérité. De fait, la plupart des contenus diffusés aujourd'hui ne sont pas faux, mais trompeurs. Au lieu d'inventer entièrement des histoires, les agents d'influence remanient du contenu fiable et l'accompagnent de manchettes très exagérées. La stratégie consiste à relier des contenus fiables à des sujets ou des personnages clivants. Comme les acteurs mal intentionnés ont toujours une longueur

d'avance (et même plusieurs) sur les services de modération des plateformes en ligne, ils donnent à de la désinformation émotionnelle la forme d'une satire, de telle façon qu'elle ne soit pas repérée par les procédures de vérification des faits. Plus que le contenu, c'est le contexte qui est transformé en une arme. Le résultat est un chaos intentionnel.

Prenons l'exemple de la vidéo sur Nancy Pelosi (la présidente de la Chambre des représentants des États-Unis), qui a circulé sur les réseaux sociaux en mai 2019. Il s'agit d'une vidéo authentique, mais un agent de désinformation en a ralenti la vitesse, puis posté le clip pour faire croire que Pelosi avait des difficultés d'élocution. Comme c'était prévu, des spectateurs de la vidéo se sont tout de suite imaginé que Nancy Pelosi était ivre, et la vidéo s'est répandue sur les réseaux sociaux. Puis les médias traditionnels s'en sont emparés, ce qui a sans doute eu pour effet de faire connaître la vidéo de beaucoup plus de gens que ce n'était le cas auparavant.

Des recherches ont montré que les reportages de format traditionnel portant sur du contenu trompeur peuvent potentiellement faire plus de mal encore. Notre cerveau est en effet programmé pour estimer la crédibilité par une approche heuristique, c'est-à-dire en procédant par des raccourcis mentaux. Cela explique que deux des mécanismes les plus efficaces pour ancrer un récit trompeur consistent à le rendre familier et à le répéter, ce qui fonctionne même si des informations contextuelles avertissent sur son caractère erroné.

Les influenceurs mal intentionnés le savent bien : en 2018, Whitney Phillips, enseignante-chercheuse en communication, culture et technologies numériques à l'université de Syracuse, dans l'État de New York, a rédigé un rapport commandé par Data & Society (un institut de recherche indépendant et à but non lucratif), qui explore la façon dont les désinformateurs utilisent des techniques encourageant les journalistes à relayer leurs contenus. Or, dans un autre rapport récent, le laboratoire d'idées IFTF (*Institute for the Future*), installé à Palo Alto, en Californie, a mis en évidence que seulement 15 % des journalistes aux États-Unis sont formés à couvrir le sujet de la désinformation de façon responsable. Les journalistes et vérificateurs d'informations, ainsi que les politiques et les influenceurs, sont confrontés à un défi central : débusquer et démonter le faux, sans pour autant amplifier sa diffusion comme ce fut le cas avec la vidéo manipulée sur Nancy Pelosi.

En janvier 2017, les journalistes de l'émission *This American Life*, sur la radio publique des États-Unis, ont interviewé une poignée de partisans de Donald Trump lors d'un DeploraBall, l'une des fêtes organisées pour célébrer l'élection de Trump. Ces personnes avaient été fortement impliquées dans la campagne en faveur de Trump sur les réseaux sociaux. L'une d'elles a commenté ainsi la surprenante ascension de Trump : « C'est par les mèmes que nous avons porté Trump au pouvoir [...]. Nous orientions la culture. »

DONALD TRUMP, PORTÉ AU POUVOIR PAR LES MÈMES ?

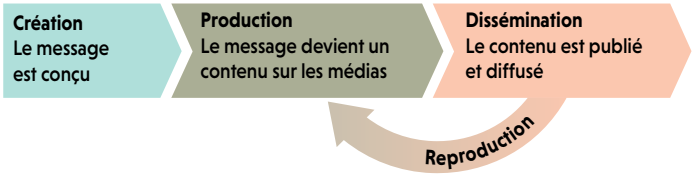
Rappelons que c'est le théoricien de l'évolution Richard Dawkins, dans son célèbre livre de 1976 *Le Gène égoïste*, qui introduisit le terme de mème. Ce mot désignait un « élément culturel transmis ou imité », c'est-à-dire toute idée, comportement ou style susceptible de se transmettre rapidement au sein d'une culture. Au cours des dernières décennies, le mot a été adopté pour décrire un type de contenu en ligne, généralement visuel, se présentant sous une forme, un style ou une esthétique particuliers, dans lequel des images colorées et frappantes se combinent avec un texte. Un tel « mème » fait souvent référence, le plus souvent implicitement, à d'autres événements culturels et médiatiques.

C'est cette référence implicite – un signe de tête ou un clin d'œil indiquant un savoir partagé sur un événement ou une personne – qui fait la force des mèmes. L'enthymème est un dispositif rhétorique dans lequel l'argumentation est présentée sans la prémisse ou la conclusion. Les clés du discours (un événement récent, une déclaration politique, une campagne publicitaire ou une tendance culturelle plus large) n'y sont souvent pas citées, ce qui oblige le spectateur à faire lui-même un lien. Cet effort supplémentaire exigé de lui est une technique de persuasion, parce qu'il crée chez l'individu le sentiment d'être connecté aux autres. Si le contenu du mème se moque d'un autre groupe

Le rôle des mèmes dans la désinformation a souvent été sous-estimé, en raison de leur aspect ludique

QUAND LA DÉSINFORMATION SE MUE EN MÉSINFORMATION

La diffusion d'informations fausses ou trompeuses se fait souvent par étapes. Elle démarre avec un agent de désinformation qui conçoit un message destiné à nuire – par exemple afin que se tiennent des manifestations publiques opposant des groupes opposés à s'affronter physiquement. L'agent crée ensuite des pages relatives à des « événements » sur Facebook. Les liens envoyant vers ces pages sont ensuite diffusés au sein des communautés en ligne susceptibles d'être intéressées. Leurs membres les relayent tout en ignorant qu'elles ont été créées sur la base d'informations fausses. Ces partages amplifient la portée de la désinformation.



ou s'indigne contre lui, le sentiment de connexion en est d'autant plus renforcé.

En raison de la nature ludique en apparence de ces présentations visuelles, une grande partie de la communauté scientifique et politique n'a pas reconnu dans les mèmes d'influents vecteurs de désinformation, de conspiration ou de haine. La mésinformation la plus efficace est pourtant celle qui est partagée, et les mèmes tendent à être relayés beaucoup plus que du texte. L'ensemble du récit qu'il contient est visible sur votre fil d'actualité, sans qu'il soit nécessaire de cliquer sur un hyperlien. Le livre d'An Xiao Mina, *Memes to Movements* (« Des mèmes aux mouvements »), paru en 2019, décrit bien comment les mèmes transforment les mouvements de protestation sociale et la dynamique du pouvoir, mais ce type d'analyse sérieuse reste rare.

Beaucoup des messages et des annonces créés sur Facebook par des Russes en lien avec l'élection américaine de 2016 étaient des mèmes. Ils se concentraient sur des candidats clivants tels que Bernie Sanders, Hillary Clinton ou Donald Trump, et sur des sujets clivants tels que les armes à feu et l'immigration. Les efforts russes ont souvent ciblé des groupes en fonction de leur appartenance raciale ou religieuse, comme Black Lives Matter (mouvement luttant contre le racisme systémique subi par les Noirs aux États-Unis) ou les chrétiens évangéliques. Lorsqu'ont été publiées les archives Facebook des mèmes générés par la Russie, certains commentaires, à l'époque, ont porté sur le manque de sophistication de ces mèmes et sur leur impact. Or les travaux ont montré que quand les gens ont peur, les récits simplistes, les explications conspirationnistes et les messages diabolisant les autres deviennent bien plus efficaces. Ces mèmes en faisaient en tout cas assez pour inciter les gens à les partager d'un simple clic.

Les plateformes en ligne telles que Facebook, Instagram, Twitter et Pinterest encouragent de façon significative ce type de comportement humain, parce qu'elles sont conçues pour être performatives (pour réaliser une action par le fait même de son énonciation). Prendre le temps de bien vérifier un contenu avant de le partager est beaucoup moins impérieux que de réaffirmer d'un clic auprès de son « public » ce que l'on aime ou ce que l'on déteste. Le système commercial d'un grand nombre de ces plateformes est lié à cette possibilité de renforcement identitaire, qui nous pousse à passer plus de temps sur leurs sites.

Des chercheurs travaillent à la mise au point d'outils permettant de traquer les mèmes sur les différentes plateformes en ligne. Mais ils ne peuvent étudier que ce à quoi ils ont accès. Or les données concernant les contenus visuels postés sur les réseaux sociaux en ligne ne sont pas mises à disposition des chercheurs. De plus, les techniques d'étude des images ou des vidéos sont beaucoup moins avancées que celles relatives aux textes. Il s'ensuit que les recherches ayant produit les solutions en cours de déploiement sont orientées de façon disproportionnée vers les tweets, les sites web ou les articles publiés *via* des URL (*uniform resource locator*, mot qui désigne l'adresse d'une page sur internet), et, de manière plus générale, vers la vérification des assertions de personnalités politiques.

UN SYSTÈME INFORMATIONNEL DIFFICILE À RÉGULER

Bien que l'on blâme beaucoup les entreprises de l'internet – et souvent pour des raisons légitimes –, elles sont aussi le produit de l'environnement commercial dans lequel elles opèrent. Aucune calibration d'algorithme, aucune mise à jour des directives de modération de contenu sur les plateformes, aucune amende ne suffiront à elles seules à réguler notre écosystème informationnel.

Dans un système informationnel sain, les gens resteraient libres d'exprimer ce qu'ils veulent, mais tout contenu conçu pour induire en erreur, inciter à la haine, renforcer le tribalisme ou nuire physiquement à des personnes ne serait pas amplifié par les algorithmes. Ce type de contenu ne pourrait pas devenir des « tendances » sur Twitter et n'apparaîtrait pas dans les recommandations sur YouTube. De même, ces contenus néfastes ne pourraient apparaître dans le fil d'actualité de Facebook, dans le contenu indexé par le moteur de recherche Reddit ou dans les premiers résultats de recherche de Google.

Tant que le problème de l'amplification des messages malveillants sur internet ne sera pas résolu, les agents de la désinformation feront une arme de notre tendance à partager sans réfléchir. Étant donné le caractère désordonné de notre écosystème informationnel, chacun doit en conséquence estimer le rôle qu'il peut jouer dans ces guerres de l'information et de quelle façon développer les compétences qui lui permettent de communiquer en ligne et hors ligne.

À l'heure actuelle, les discussions relatives à la sensibilisation du public tournent beaucoup autour de l'éducation aux médias, souvent sur un ton assez paternaliste suggérant qu'il suffirait d'enseigner aux usagers des réseaux sociaux comment consommer plus intelligemment de l'information. Il serait préférable d'apprendre aux internautes à développer un scepticisme émotionnel et à résister à l'assaut de contenus conçus pour déclencher des préjugés et des peurs primaires.

LA MANIPULATION PAR DES ÉVÉNEMENTS FACEBOOK

Tout usager d'un réseau social sur internet ferait bien de savoir comment celui-ci fonctionne, et en particulier comment les algorithmes déterminent ce que l'utilisateur voit « en priorisant les messages qui déclenchent des conversations et des interactions intéressantes entre les gens » comme le patron de Facebook, Marc Zuckerberg, l'a lui-même exprimé lors d'une conférence de Facebook en janvier 2018.

Je recommande aussi que tout un chacun essaie, au moins une fois, d'acheter une publicité sur Facebook. Cela permet en effet de réaliser la finesse de l'information dont dispose la plateforme : on peut ainsi y choisir de cibler une catégorie de personnes aussi précise que les femmes arabophones âgées de 32 à 42 ans, diplômées du supérieur, élevant deux à trois enfants en âge d'aller à l'école primaire dans la région de Brignoles, dans le Var, et ayant donné des signes de leur appréciation de Ségolène Royal.

Il est même possible de tester des messages publicitaires dans des environnements vous évitant d'apparaître. Certaines organisations se servent ainsi de ce genre de « publicités fantômes » pour envoyer des messages à des catégories de personnes spécifiques sans les faire apparaître sur leur propre page. D'où la difficulté qu'ont les chercheurs et les journalistes à repérer quels messages ciblent qui, ce qui est particulièrement préoccupant lors d'une campagne électorale.

Les invitations ciblées autour d'un événement à venir, comme les « événements Facebook », sont un autre canal de manipulation. L'un des exemples les plus inquiétants d'ingérence étrangère dans une élection américaine est une manifestation entièrement orchestrée à Houston, au Texas, par des influenceurs malveillants russes. Ils avaient créé sur Facebook deux pages à l'apparence authentiquement américaines. L'une, portant le nom de Heart of Texas (« cœur du Texas ») soutenait la sécession ; un « événement » appelé *Stop Islamification of Texas* (« Arrêtons l'islamisation du Texas ») y était annoncé pour le 21 mai 2016. La seconde page, nommée United Muslims of America (« musulmans unis d'Amérique »), appelait à manifester exactement à la même date et au même endroit lors d'un événement intitulé *Save Islamic Knowledge* (« Sauvons le savoir islamique ») ! Résultat : deux groupes de personnes sont arrivés sur les lieux pour manifester les unes contre les autres, tandis que les vrais organisateurs des deux manifestations se réjouissaient d'avoir réussi à exacerber les tensions à Houston…

Une autre tactique très utilisée par les désinformateurs est l'*astroturfing*, qui consiste à simuler un mouvement citoyen venu de la base. Le terme a d'abord été associé aux personnes rédigeant de faux commentaires sur des produits vendus en ligne ou tentant de faire croire qu'une communauté de fans est plus grande qu'elle ne l'est en réalité. Aujourd'hui, les campagnes automatisées utilisent des robots logiciels (des *bots*) ou une coordination élaborée de partisans fanatiques et d'influenceurs rémunérés, voire une combinaison des deux, pour faire croire qu'une personne ou une politique bénéficie d'un considérable soutien populaire. En créant certaines tendances et au moyen de hashtags sur Twitter, ils espèrent faire reprendre par les médias professionnels ces messages, puis faire amplifier le mouvement afin de réduire au silence des personnes et des organisations particulières.

DÉVELOPPER DE LA RÉSILIENCE

Comprendre comment chacun de nous est embarqué à son insu dans de telles campagnes est une première étape cruciale pour les combattre. Mais le plus important est peut-être d'admettre sereinement que notre société est très vulnérable face à l'amplification artificielle de l'information. Les propos alarmistes ne peuvent qu'alimenter le complotisme et continuer de réduire la confiance dans les sources d'information de qualité et les institutions démocratiques.

Il n'existe pas de solution définitive face aux récits instrumentalisés. Il nous faut s'adapter à cette nouvelle réalité. Tout comme les gens ont, avec le temps, pris l'habitude de se protéger la peau avec de la crème solaire, devenue de plus en plus performante à mesure des progrès scientifiques, il va nous falloir développer notre résilience dans un environnement informationnel hostile. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Xiao Mina, **Memes to Movements : How the World's Most Viral Media Is Changing Social Protest and Power**, Beacon Press, 2019.

E. Van Duyn et J. Collier, **Priming and *fake news* : The effects of elite discourse on evaluations of news media**, *Mass Communication and Society*, vol. 22(1), pp. 29-48, 2019.

S. Dieguez, **Total Bullshit ! Au cœur de la post-vérité**, PUF, 2018.

Y. Benkler *et al.*, **Network Propaganda : Manipulation, Disinformation, and Radicalization in American Politics**, Oxford University Press, 2018.

C. Wardle et H. Derakhshan, **Information Disorder : Toward an Interdisciplinary Framework for Research and Policy Making**, Conseil de l'Europe, octobre 2017.

théâtres parisiens associés.com

LA REINE BLANCHE
scène des arts et des sciences

DES SAVANTS SUR LES PLANCHES

(UN.E SAVANT.E) + (DES ARTISTES)

les mardis à 20h45

8 OCTOBRE
→ La perception dans tous ses états

3 DÉCEMBRE
→ WWW vs WWW (World Wide Web vs Wood World Wired) la lutte pour le réseau

28 JANVIER
→ Les mathématiques pétillantes

24 MARS
→ En cuisine !
Vers une nouvelle théorie de la psyché

26 MAI
→ Y'a un os... Quand la paléontologie se fait chorégraphie & l'obstétrique politique

9 JUIN
→ Interactions intemporelles, la mise en musique et en images d'une exploration mathématique

Les savants montent sur les planches et y dialoguent avec des artistes. La science est austère, pensez-vous ?
Pas à La Reine Blanche !

Théâtre La Reine Blanche
2 bis passage Ruelle — Paris 18e
M → Marx Dormoy → La Chapelle

Réserver au 01 40 05 06 96
ou sur le site → www.reineblanche.com
Renseignements : billetterie@scenesblanches.com

PLUTON magazine

POUR LA SCIENCE

L'ESSENTIEL

- Les réseaux sociaux du web ont facilité la prolifération de croyances erronées à une échelle inédite.
- Leurs modèles montrent que des personnes diffusant de la propagande peuvent facilement manipuler les croyances des gens, en dépit des preuves scientifiques bien établies qui contredisent les idées véhiculées.
- En simulant la façon dont elles se propagent au sein de groupes d'individus, les chercheurs étudient comment la confiance sociale et le conformisme amènent les communautés à un consensus.

LES AUTEURS

CAILIN O'CONNOR
maîtresse de conférences en logique et philosophie des sciences à l'université de Californie à Irvine, aux États-Unis

JAMES O. WEATHERALL
professeur de logique et philosophie des sciences à l'université de Californie à Irvine

Comment enrayer une épidémie de désinformation ?

Pour se prémunir de la désinformation, il ne suffit pas que les gens soient bien renseignés et qu'ils aient un esprit critique. Des modèles décrivant la propagation des idées fausses montrent que le conformisme et la confiance sociale sont deux autres facteurs essentiels à considérer.

Au milieu du XIXe siècle, une grosse chenille, celle du sphinx de la tomate, s'est répandue dans le nord-est des États-Unis. Cette prolifération a été suivie de rapports terrifiants sur des empoisonnements mortels et divers désagréments dus au contact. En juillet 1869, des journaux de la région ont mis en garde leurs lecteurs contre l'insecte en racontant l'histoire d'une jeune fille morte dans des convulsions après avoir bataillé avec une chenille dont elle cherchait à se débarrasser. À l'automne, le *Syracuse Standard* publiait un compte rendu d'un certain Dr Fuller ayant recueilli un énorme spécimen. Le médecin prévenait que l'insecte était aussi « venimeux qu'un serpent à sonnette » et affirmait être informé de trois décès dus à l'abominable bestiole.

Sauf que tout cela était faux. Le sphinx de la tomate est certes un mangeur vorace, capable de dénuder un plant de tomates en quelques jours, mais il est inoffensif pour les humains. Les entomologistes le savaient depuis plusieurs décennies, et d'ailleurs les experts se sont moqués des affirmations fantaisistes de Fuller.

Mais les rumeurs ont persisté alors même que la vérité était aisément accessible. Pourquoi ? Parce que nous sommes des animaux sociaux, y compris en matière d'apprentissage. L'essentiel de nos croyances provient de sources que nous estimons fiables : nos professeurs, nos parents, nos amis… La transmission sociale du savoir est au cœur de la culture et de la science, par exemple. Mais comme le montre l'anecdote du sphinx de la tomate, les idées auxquelles nous croyons et que nous diffusons sont parfois fausses.

Ces derniers temps, la façon dont la transmission sociale de la connaissance peut nous mystifier a, hélas, plusieurs fois fait ses preuves. Les réseaux sociaux du web ont alimenté une épidémie de fausses informations et de méprises sur des sujets allant de la prévalence de la fraude électorale à la question de savoir si la fusillade à l'école de Sandy Hook n'avait pas été une mise en scène, en passant par la nocivité des vaccins. Les mêmes mécanismes de base qui avaient semé la peur du sphinx de la tomate se sont

désormais intensifiés et ont parfois conduit à une méfiance profonde envers les institutions publiques. L'une des conséquences est la plus importante épidémie de rougeole ayant sévi depuis vingt ans.

Le mot méprise peut paraître ici comme un euphémisme. Parmi les fausses croyances causant le plus de dégâts, beaucoup résultent d'une propagande et d'une désinformation délibérées, destinées à nuire. Mais une partie de ce qui rend la propagande et la désinformation si efficaces à l'époque des réseaux sociaux est que les gens qui y sont exposés les partagent auprès de leurs amis et leurs collègues sans intention de les tromper. Les réseaux sociaux transforment ainsi la *désinformation* en *mésinformation*.

De nombreux théoriciens de la communication et chercheurs en sciences sociales ont analysé pourquoi les fausses croyances avaient la vie si dure et se sont inspirés de la propagation des maladies pour le comprendre. Dans un modèle mathématique d'épidémie, les idées sont analogues à des virus qui se transmettraient de cerveau à cerveau. Les chercheurs ont ainsi utilisé des modèles simulant de façon simplifiée les interactions sociales entre individus.

À quoi ressemble concrètement ce type de modèle ? À un réseau représentant la population, où chaque nœud symbolise un individu et où les arêtes entre nœuds indiquent les liens sociaux. Dans la phase d'initialisation du réseau, les chercheurs sèment un germe, c'est-à-dire une idée dans un cerveau, puis observent comment il contamine les autres nœuds. La transmission a lieu quand certaines conditions liées aux relations entre individus sont remplies.

MODÉLISER LA PROPAGATION DES IDÉES FAUSSES

Bien qu'ils soient extrêmement simples, les modèles de contagion parviennent à expliquer d'étonnants épisodes, comme l'épidémie de suicides qui a sévi en Europe après la parution en 1774 du roman de Goethe *Les Souffrances du jeune Werther*, ou celle survenue en 1962, où des dizaines de travailleurs américains du textile se sont plaints de nausées et de somnolence après avoir été piqués par un insecte imaginaire.

Ces modèles aident aussi à comprendre la diffusion de croyances erronées sur internet. Avant la dernière élection présidentielle aux États-Unis, une photo de Donald Trump jeune est apparue sur Facebook, accompagnée d'une prétendue citation tirée d'un entretien de 1998 dans le magazine *People*. Donald Trump y affirmait que s'il briguait un jour la présidence, ce serait en tant que républicain, car le parti était le « corps électoral le plus stupide ». On ignore qui était le patient zéro (l'origine de la rumeur), mais on sait que ce mème a circulé rapidement.

La véracité du mème n'a pas tardé à être mise en doute et infirmée. Le site web Snopes, spécialisé dans la vérification d'informations, a rapporté que la citation avait été fabriquée de toutes pièces dès octobre 2015. Mais, comme avec le sphinx de la tomate, les efforts pour rétablir la vérité n'ont rien changé à la propagation de la rumeur. Rien qu'une seule copie du mème avait déjà été partagée plus d'un demi-million de fois. Les années suivantes, alors que de nouveaux individus la partageaient, la fausse croyance infectait leurs amis qui, à leur tour, l'introduisaient dans de nouvelles régions de la Toile.

Ce phénomène explique pourquoi des mèmes largement partagés semblent imperméables à toute forme de vérification. Chaque individu-maillon de la chaîne a fait confiance au maillon précédent et s'est dispensé du travail de vérification. On pourrait croire que le problème est dû à la paresse intellectuelle et à la crédulité, et que la solution passerait par l'enseignement et le développement chez tous d'un esprit critique. En fait, les choses sont plus compliquées. Parfois, les croyances erronées perdurent et diffusent même dans des communautés où la recherche de vérité et de preuves est une valeur cardinale. Dans ces cas, le problème n'est pas une confiance exagérée accordée aux propos ou idées d'autrui. Il est beaucoup plus profond.

Plus de 140000 personnes suivent la page Facebook *Stop Mandatory Vaccination* (« Halte à la vaccination obligatoire »). Ses modérateurs publient régulièrement des documents – articles d'actualité, publications scientifiques, entretiens avec des personnalités… – destinés à prouver à la communauté que les vaccins sont nocifs ou

Les opposants à la vaccination répandent des informations mensongères sur la sécurité des vaccins et mettent en avant la « liberté de choix », comme ici lors d'une manifestation contre la loi californienne SB277 qui a abrogé l'exemption à la vaccination obligatoire pour « convictions personnelles ».

nefficaces. Sur d'autres groupes Facebook, des milliers de parents inquiets posent des questions sur la sécurité des vaccins et y répondent en se partageant articles scientifiques et conseils juridiques qui encouragent à la résistance vis-à-vis de la vaccination. Les membres de ces communautés en ligne se préoccupent sincèrement de savoir si les vaccins sont nocifs et cherchent activement à connaître la vérité. Les conclusions qu'ils tirent sont pourtant erronées et dangereuses. Comment expliquer ce paradoxe?

Le modèle classique de contagion est inadéquat pour répondre à cette question. On doit pouvoir prendre en compte les cas où les personnes élaborent des croyances sur la base de preuves qu'elles rassemblent et se partagent. Ce modèle doit aussi intégrer les raisons qui, initialement, poussent ces individus à rechercher la vérité. En matière de santé, fonder ses choix personnels sur des croyances erronées peut avoir de graves conséquences. Si les vaccins sont sûrs et efficaces (c'est le cas…) et que les parents ne se font pas vacciner, ceux-ci exposent leurs enfants et le reste de la société à des risques inutiles. Si les vaccins sont douteux, comme l'ont conclu les participants à ces groupes sur Facebook, les

Les croyances des gens influent sur leur comportement, et réciproquement

risques sont inversés. Face à de tels enjeux, déterminer ce qui est vrai et agir en conséquence est d'une grande importance.

Pour mieux intégrer ce comportement dans nos recherches, nous avons utilisé la science des réseaux, notamment des outils mathématiques développés il y a vingt ans par des économistes pour étudier la propagation sociale des croyances dans une communauté. Les modèles de ce type se composent d'un problème et d'un réseau d'individus, ou «agents». Le problème revient à faire un choix parmi deux options, par exemple «vacciner ses enfants» ou «ne pas les vacciner». Face à cette question, certains agents pensent que la vaccination est sans danger et efficace, alors que d'autres sont d'avis qu'elle provoque l'autisme. Les croyances des agents façonnent leur comportement – par exemple,

ceux qui pensent que la vaccination est sans danger choisissent de procéder à la vaccination. En retour, le comportement des agents engendre des croyances: lorsque les agents se vaccinent et ne constatent aucun effet négatif, ils deviennent davantage convaincus que la vaccination est sans danger.

La seconde partie du modèle est un réseau représentant les liens sociaux. Les agents peuvent non seulement apprendre de leur propre expérience de la vaccination, mais aussi de l'expérience de leurs voisins. Ainsi, les croyances qu'ils développeront dépendront de la communauté à laquelle ils appartiennent.

AU-DELA DES MODELES SIMPLES

Ces simulations de la propagation de croyances saisissent des propriétés essentielles qui manquent aux modèles de contagion: les individus rassemblent sciemment des données, les partagent et font ensuite l'expérience de mauvaises croyances. Quelles leçons importantes sur la diffusion du savoir nous enseignent les simulations de ce type?

D'abord, qu'œuvrer de concert est plus efficace que procéder seul: un individu isolé peut vite aboutir à une mauvaise théorie. Par exemple, quelqu'un peut très bien être le témoin d'un cas où un enfant est devenu autiste après une vaccination et en conclure à tort que les vaccins ne sont pas sûrs. En revanche, une communauté est encline à la diversité d'opinions; certains membres testeront une action et leurs pairs une autre. Cette variété assure, en temps normal, que le groupe réunira assez de preuves pour aboutir *in fine* aux bonnes croyances.

Mais aussi vertueux soit-il, ce travail collectif ne garantit pas que les agents apprendront la vérité. Le problème vient du caractère probabiliste des preuves scientifiques. Par exemple, certains non-fumeurs développent un cancer des poumons, tandis que certains fumeurs y échappent. De même, l'absence de lien statistique entre l'autisme et la vaccination n'exclut pas que certains enfants vaccinés puissent devenir autistes. Ainsi, certains parents observeront nécessairement que leur enfant développe les symptômes autistiques après s'être fait vacciner. Ce type de fausses preuves peut induire en erreur toute une communauté.

Dans la version élémentaire du modèle, les influences sociales conduisent à un consensus final: la communauté décide si la vaccination est dangereuse ou non. Mais ce fonctionnement ne correspond pas à la réalité. Dans les vraies communautés, on observe une polarisation des opinions – des désaccords tranchés sur la question de savoir s'il faut vacciner ou non. Selon nous, ce modèle omet deux ingrédients cruciaux: la confiance sociale et le conformisme.

La confiance sociale entre en jeu quand les individus considèrent certaines sources

DES RÉSEAUX POUR MODÉLISER LA DIFFUSION DES IDÉES

Les auteurs utilisent la science des réseaux pour mieux comprendre comment les liens sociaux influencent les croyances et les comportements. Ils montrent comment les croyances erronées se propagent. Ici sont présentés deux types de modèles *(l'un en vert, l'autre en rouge)* qui incarnent deux types de circulation des idées et des croyances. Dans les réseaux modélisés, chaque nœud représente un individu, et chaque arête reliant deux nœuds représente un lien social.

LES MODÈLES DE CONTAGION

Les modèles de contagion traitent les idées ou les croyances comme des virus qui se propagent entre individus dans un réseau social. Cette « infection » peut se réaliser de diverses façons. Dans certains modèles, une personne sera infectée par une idée si l'une de ses relations l'est aussi. Dans d'autres, l'individu adopte l'idée en question quand un pourcentage précis des personnes qui lui sont liées ont déjà été contaminées. Ici sont illustrés des modes de contagion où chaque individu adopte une nouvelle croyance quand au moins 25 % de ses relations y croient. Dans ce type de modèles, la structure du réseau joue sur la vitesse de propagation.

COMMENT LIRE LES GRAPHES DE CONTAGION

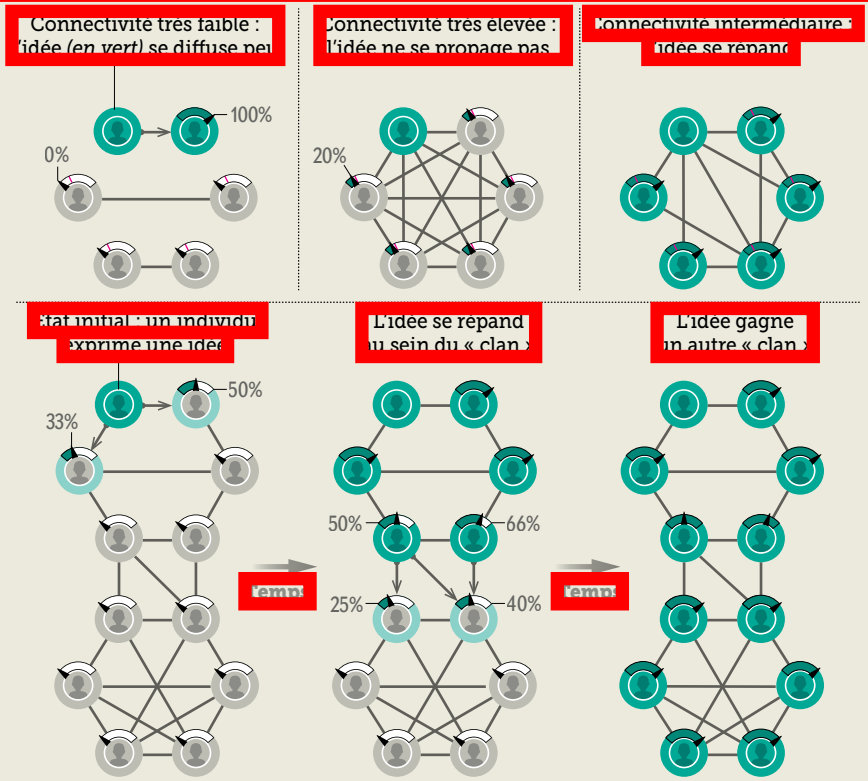
Chaque nœud est un individu, influencé par les idées des autres.

Chaque arête représente un lien social entre deux individus.

La jauge dessinée dans le haut d'un nœud indique le pourcentage des gens connectés à cette personne qui partagent la croyance considérée *(représentés en vert)*. Dans le scénario ci-dessous, le seuil à partir duquel un individu embrassera la croyance de ses relations est de 25 %.

DIFFUSION ET CONNECTIVITÉ :

Dans les groupes d'individus peu connectés, les idées n'atteignent pas tous les membres. Parfois, un trop grand nombre de liens peut également stopper la diffusion d'une idée. Certains réseaux font apparaître des « clans », c'est-à-dire des sous-groupes d'individus au sein desquels les idées sont bloquées et essaiment difficilement en dehors d'eux *(graphe du bas)*.

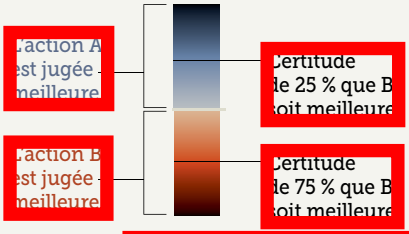


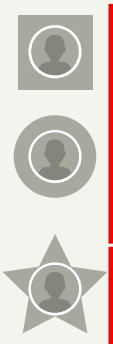
LES MODÈLES DE RÉSEAUX ÉPISTÉMIQUES

Les modèles de réseaux épistémiques simulent des situations dans lesquelles les gens adoptent des croyances par la collecte et le partage d'informations. Ce type de modèle s'applique dans de nombreux cas aux sciences. Les croyances ne se propagent pas simplement d'un individu à un autre. Chaque individu croit en une idée avec un certain degré d'incertitude. Cela l'encourage à rassembler des preuves appuyant son opinion, et ces preuves changent en retour ses croyances. Chaque individu partage ses preuves avec ses relations, ce qui influence aussi leurs croyances.

COMMENT LIRE LES GRAPHES DE RÉSEAUX ÉPISTÉMIQUES

Chaque nœud circulaire ou carré représente un individu influencé par les preuves que présentent les autres. Chacun est plus ou moins en faveur de l'action A *(bleu)* ou de l'action B *(orange)*, opinion qui peut se renforcer, s'affaiblir ou basculer avec le temps *(changement de couleur)*. Le degré de certitude, exprimé en pourcentage, est représenté par l'intensité de la couleur. Si la certitude vis-à-vis de l'action est supérieure à 50 %, l'individu effectue cette action. On utilise ensuite le théorème de Bayes de la théorie des probabilités pour mettre à jour les degrés de croyance des membres du réseau.



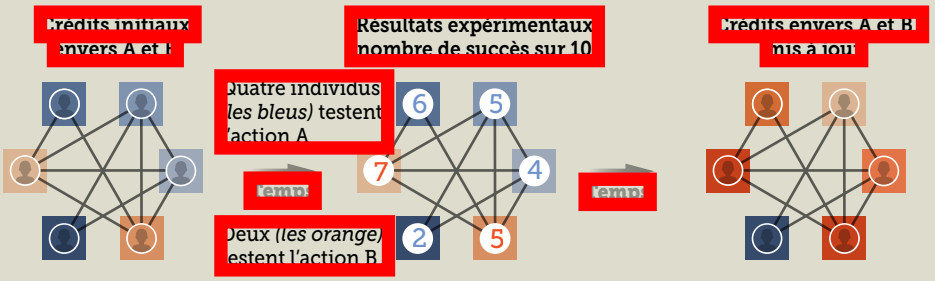


Nœuds carrés : individus qui testent des actions et révisent leurs croyances en conséquence (chercheurs de preuves)

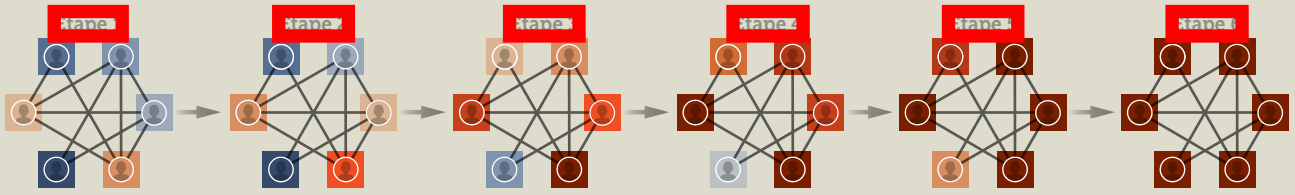
Nœuds ronds : individus qui observent les résultats des autres, mais qui ne testent pas leurs propres actions (observateurs)

Étoiles : individus ne cherchant pas à se faire une opinion, mais qui introduisent dans le système des résultats choisis de façon biaisée (propagandistes)

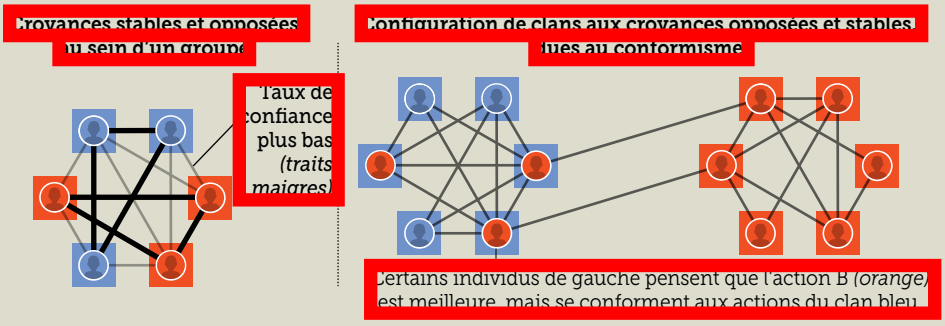
EXPÉRIMENTATIONS ET MISE À JOUR DES CROYANCES : Dans ces modèles, les individus démarrent avec un degré de confiance envers l'action A ou B : ils accordent un certain crédit à A ou B). Puis ils réalisent l'action qu'ils préfèrent, c'est-à-dire expérimentent. Le résultat dicte le succès de cette action, qu'ils partagent ensuite avec leurs voisins. Puis chaque individu met à jour son crédit sur la base des observations.



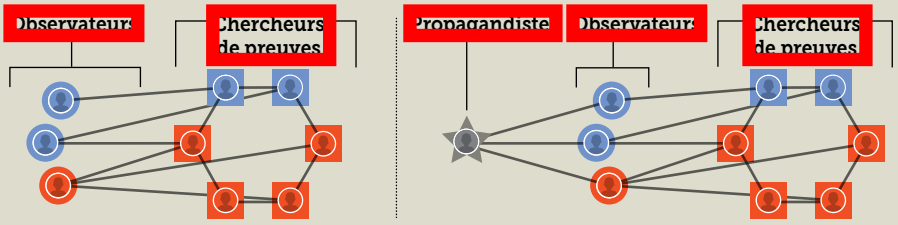
CONVERGENCE VERS UNE CROYANCE PARTAGÉE : Au fil du temps, les liens sociaux entraînent l'apparition d'une préférence consensuelle envers A ou B au sein des groupes. La collecte et le partage de preuves leur indiquent qu'une de ces actions est meilleure que l'autre. Par exemple, un individu essayant la pire action verra ses relations obtenir de bien meilleurs résultats et changera d'opinion. Cependant, il arrive que des suites de preuves trompeuses entraînent l'ensemble du groupe à choisir l'action la pire.



POLARISATION : Si l'on ajoute la confiance sociale et le conformisme à ces modèles, un consensus n'est pas forcément obtenu. Si chaque individu fait confiance aux preuves présentées par ceux qui partagent ses croyances, il se crée des clans aux opinions tranchées qui n'écoutent plus les autres. Si chaque individu cherche à conformer ses actions à celles des autres, les bonnes idées échouent à se propager entre clans.



OBSERVATEURS, CHERCHEURS DE PREUVES ET PROPAGANDISTES : On peut utiliser ces modèles pour représenter les groupes de chercheurs de preuves, les groupes d'observateurs qui mettent à jour leurs croyances sur la base de ces preuves, et des propagandistes éventuels qui tentent d'induire en erreur les observateurs.



MISE À JOUR DES CROYANCES EN SITUATION D'INFORMATION BIAISÉE : Les lobbies industriels façonnent l'opinion publique en ne présentant que les résultats scientifiques qui confortent leurs positions, et en omettant les autres. Cela peut induire en erreur le public, même lorsque les chercheurs de preuve aboutissent à un consensus sur la croyance opposée.

l'information comme plus sûres que d'autres. C'est ce que nous constatons quand les antivaccins accordent davantage de crédit aux membres de leur communauté qu'aux autorités de santé publique ou aux organismes de recherche médicale. Cette méfiance peut résulter de diverses causes : de mauvaises expériences passées avec des médecins ou du sentiment que les institutions publiques servent certains intérêts, par exemple. Elle peut être compréhensible, étant donné la longue histoire de médecins et de chercheurs qui ont ignoré des questions légitimes soulevées par des patients.

Quoi qu'il en soit, le résultat net est que les antivaccins ne se renseignent pas auprès de ceux qui détiennent les meilleures informations sur le sujet. Dans les versions du modèle où les individus ne font pas confiance aux gens ayant des opinions très différentes, on constate que la communauté se polarise et que les individus aux croyances erronées n'apprennent pas des autres.

PRENDRE EN COMPTE LA CONFIANCE SOCIALE ET LE CONFORMISME

Second élément manquant au modèle de base, le conformisme est la tendance, profondément enracinée dans la psyché humaine, des individus à calquer leur comportement sur celui de leur communauté. Quand notre modèle intègre le conformisme, on voit émerger des groupes de gens qui campent sur leurs positions. L'explication est que les agents connectés au monde extérieur ne transmettent plus les informations contredisant les croyances du groupe. Ainsi, de nombreux membres du groupe ne sont jamais confrontés à ces informations.

Le conformisme aide à expliquer pourquoi les sceptiques vis-à-vis des vaccins tendent à se concentrer au sein de certaines populations. Certaines écoles privées sous contrat du sud de la Californie ont des taux de vaccination particulièrement bas. Il en est de même parmi les immigrants somaliens de Minneapolis et chez les juifs orthodoxes de Brooklyn – deux communautés qui ont récemment subi une épidémie de rougeole.

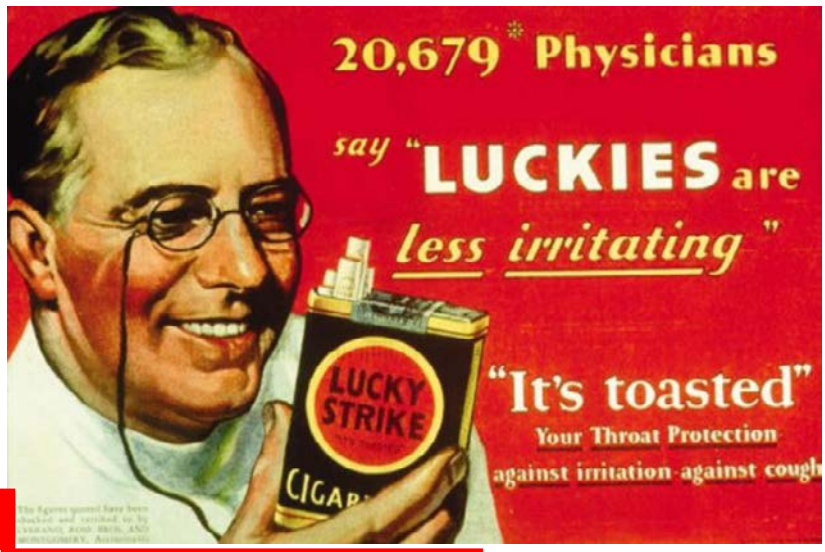
Pour être efficace, la lutte contre l'opposition à la vaccination doit prendre en compte les phénomènes de confiance sociale et de conformisme. Se contenter d'exposer et partager les informations fiables et probantes a peu de chance de réussir, en raison de la défiance de ces populations. Et convaincre des personnes à la fois écoutées par leur communauté et sensibles aux vraies informations de défendre la vaccination serait difficile, à cause du conformisme. La meilleure approche est de trouver des individus ayant suffisamment en commun avec les communautés concernées pour gagner leur confiance. Un rabbin, par exemple, pourrait être à Brooklyn un ambassadeur très efficace pour une campagne en faveur de la vaccination, tandis qu'en Californie il serait plus judicieux de demander la participation de l'actrice Gwyneth Paltrow.

Pourquoi les opinions tranchées émergent-elles dans les réseaux sociaux ? La confiance sociale et le conformisme peuvent être des éléments de réponse, mais dans certains cas au moins, comme la communauté somalienne dans le Minnesota et les juifs orthodoxes de New York, ils ne sont qu'une partie de l'histoire. Les deux groupes étaient la cible de véritables campagnes de désinformation orchestrées par des opposants à la vaccination.

Les gens pour qui nous votons, les biens que nous achetons, les chanteurs ou les acteurs que nous adorons, tout cela est influencé par nos croyances sur le monde. Des entreprises et des personnes riches et puissantes l'ont bien compris et tentent de façonner les croyances du public pour servir leurs propres intérêts, y compris sur des questions qui touchent à la science. Il serait naïf de croire que les entreprises essayent de modifier les croyances scientifiques en achetant des scientifiques véreux. Cette corruption existe peut-être, mais une analyse détaillée de cas historiques montre qu'il existe des stratégies plus subtiles – et sans doute plus efficaces – utilisées par l'industrie, les États-nations et d'autres groupes. Pour nous protéger de ce type de manipulation, la première chose à faire consiste à comprendre le fonctionnement de ces campagnes de désinformation.

Un exemple classique provient de l'industrie du tabac, qui a recouru à de nouvelles techniques de propagande dans les années 1950 pour combattre le consensus croissant selon lequel fumer tue. Durant les années 1950 et 1960, l'Institut du tabac a publié un bulletin bimestriel intitulé *Tobacco and Health* (« Le tabac et la santé ») qui informait de façon biaisée sur les études scientifiques. On n'y évoquait que celles allant dans le sens de l'innocuité du

Pour parvenir à leurs fins, les lobbies ne font part que des études qui leur sont favorables



Notamment dans ses publicités *(ici une publicité datant de 1930)*, l'industrie du tabac a mobilisé le corps médical en faveur des cigarettes.

tabac ou soulignant les incertitudes sur ses effets néfastes.

Pour parvenir à leur fin, ces lobbies emploient dans leurs brochures une méthode que nous avons appelée le partage sélectif. Elle consiste à partir de véritables recherches indépendantes et à ne sélectionner que celles favorisant une certaine opinion. En nous fondant sur les variantes des modèles décrits plus haut, nous avons montré que le partage sélectif peut influencer considérablement les croyances du grand public relatives à des questions scientifiques. En d'autres termes, des acteurs motivés peuvent utiliser des germes de vérité pour semer le doute ou même pour convaincre les gens d'affirmations mensongères.

Le partage sélectif a été un élément clé du bréviaire des antivaccins. Avant la récente épidémie de rougeole à New York, une organisation se faisant appeler « Parents éduquant et défendant la santé des enfants » (PEACH) avait produit et distribué un dépliant de 40 pages intitulé « Le manuel de référence sur la sécurité des vaccins ». Les informations qu'on y lisait avaient été sélectionnées avec soin et se concentraient sur une poignée d'études scientifiques suggérant des risques associés à ce mode de prévention – et omettaient les nombreuses études concluant à l'innocuité des vaccins.

Le manuel de PEACH était particulièrement efficace parce qu'il combinait le partage sélectif avec des stratégies rhétoriques. Il instaurait un climat de confiance avec les juifs orthodoxes et insistait sur les préoccupations susceptibles de les intéresser. Il piochait sournoisement dans des éléments répulsifs pour son public, par exemple en indiquant que certains vaccins contiennent de la gélatine de porc. Volontairement ou non, la brochure exploitait la confiance sociale et le conformisme.

BIBLIOGRAPHIE

C. O'Connor et J. O. Weatherall, **The Misinformation Age**, Yale University Press, 2019.

M. Moussaid, **Foulescopie. Ce que la foule dit de nous**, Humensciences, 2019.

É. Ostian, **Désinformation**, Plon, 2019.

D. A. Broniatowski *et al.*, **Weaponized health communication : Twitter bots and Russian trolls amplify the vaccine debate**, *American Journal of Public Health*, vol. 108(10), pp. 1378-1384, 2018.

R. Badouard, **Le Désenchantement de l'internet**, FYP Éditions, 2017.

N. Case, **The Wisdom and/or Madness of Crowds**, jeu interactif de contagion sur un réseau : https://ncase.me/crowds.

Pire, les propagandistes développent sans cesse des méthodes de manipulation de l'opinion de plus en plus élaborées. Au cours des dernières années sont apparues de nouvelles façons de vous laisser penser que vos croyances erronées sont partagées largement, y compris par vos amis et d'autres personnes à qui vous pouvez vous identifier. Mises en œuvre sur les réseaux sociaux, ces stratégies reposent notamment sur l'utilisation de robots Twitter, de trolls rémunérés et, plus récemment, sur le piratage et la copie des comptes de vos amis. Selon un article paru en 2018 dans l'*American Journal of Public Health*, une campagne de désinformation sur les vaccins aurait été menée *via* des comptes gérés en sous-main en Russie. L'opération aurait cherché à amplifier la discorde aux États-Unis et à transformer en arme un problème de santé publique.

RESPECTER LA DÉMOCRATIE

La sophistication de tels campagnes et procédés pose un problème sérieux pour la démocratie. Pour reprendre l'exemple de la rougeole, dans de nombreux États américains, les enfants peuvent être dispensés de vaccination obligatoire sur la base de « convictions personnelles ». En Californie, le sujet est devenu particulièrement sensible en 2015, quand l'origine d'une épidémie de rougeole a pu être attribuée à une visite de Disneyland par des enfants non vaccinés. À la suite de l'enquête, le gouverneur a signé une nouvelle loi supprimant l'exemption. Immédiatement, les opposants aux vaccins ont cherché, heureusement sans succès, à obtenir qu'une nouvelle loi soit soumise au référendum.

Doit-on soumettre la réponse à une question scientifique – les vaccins sont-ils ou non inoffensifs ? – à un vote de non-experts ? Non, bien sûr. *A fortiori* si l'opinion de ces personnes a été guidée par des campagnes de désinformation. Nous avons besoin d'un système qui non seulement admet que la science est le meilleur moyen dont nous disposons pour accéder à la vérité, mais qui respecte aussi les valeurs démocratiques fondamentales de façon à empêcher qu'un seul groupe, scientifiques compris, puisse dicter sa politique.

Nous n'avons pas de solution toute faite pour bâtir un système décisionnaire qui équilibrerait parfaitement ces préoccupations contradictoires. Mais selon nous, la clé est de bien distinguer deux questions essentielles : 1) Quels sont les faits ? 2) Comment agir en conséquence ? Les idéaux démocratiques exigent que chaque fois que ces questions se posent, elles soient examinées sous le regard de l'opinion publique en toute transparence et responsabilité. Mais ce n'est que la seconde – quelle décision prendre à la lumière des faits ? – qui devrait faire l'objet d'un vote. ■

La Terre est plate, proclament aujourd'hui sans vergogne et sans arguments valables un nombre étonnamment élevé d'individus. La pensée critique est un moyen de déterminer si cette affirmation est vraie ou fausse. On connaît la réponse depuis plus de deux millénaires…

L'ESSENTIEL

- Internet et les réseaux sociaux en ligne regorgent d'informations fausses ou douteuses, qui se propagent facilement.
- On peut apprendre, dès l'école, à mieux distinguer le vrai du faux – notamment en raisonnant, en croisant les données, en les comparant et en admettant ses propres limites.
- Des programmes éducatifs se développent partout dans le monde afin de développer le sens critique des élèves.
- Les évaluations existantes de ces interventions pédagogiques montrent qu'elles ont une certaine efficacité. Elles font aussi ressortir deux facteurs importants dont dépend cette efficacité.

LES AUTEURS

NICOLAS GAUVRIT
chercheur en sciences cognitives au laboratoire CHArt de l'École pratique des hautes études (EPHE), à Paris

ELENA PASQUINELLI
chercheuse en philosophie et sciences cognitives, professeure à l'École normale supérieure, à Paris

Enseigner l'esprit critique

Face au flot d'informations qui nous inonde aujourd'hui, il est crucial d'exercer notre esprit critique en permanence afin de ne pas être abusés. Une façon de penser à acquérir dès l'école

Selon votre bord politique, peut-être avez-vous pensé que tels ou tels votants ont manqué de discernement lors de la dernière élection présidentielle en France en 2017. Qu'ils n'ont pas su distinguer les hypothèses des faits, les suppositions des conséquences logiques. Qu'ils sont tombés dans les pièges rhétoriques les plus grossiers, incapables d'analyser les arguments égrenés au fil des discours de candidats déloyaux. Ou bien encore qu'ils ont voté avec leurs tripes plutôt qu'avec leur cerveau. En quelques mots: qu'ils ont manqué d'esprit critique. C'est pourtant bien sur cet esprit critique, supposé acquis chez les citoyens responsables, que repose la légitimité de l'élection.

En politique, l'égarement des uns est la perspicacité des autres, car nous sommes au royaume de l'opinion. Dans d'autres domaines plus scientifiques ou plus tangibles, en revanche, un manque d'esprit critique conduit parfois à des décisions dont on peut démontrer qu'elles sont absurdes, dangereuses pour soi et son entourage, voire pour l'humanité.

LA TERRE EST PLATE ET L'AUTISME CAUSÉ PAR UN VACCIN...

On peut s'amuser des contorsions logiques de ceux qui, comme la légende du basket-ball Shaquille O'Neal, pensent que la Terre est plate. Il est moins réjouissant que des maladies invalidantes, parfois mortelles, réapparaissent – la rougeole en Europe ou la coqueluche en

Angleterre –, parce qu'une partie de la population considère la vaccination dangereuse et la refuse. Des célébrités prennent position contre les applications de la science, par exemple l'actrice Jenny McCarthy, convaincue que l'autisme de son fils Evan est la conséquence d'un vaccin. Le même rejet de la science touche le changement climatique, nié jusque dans l'entourage de Donald Trump quand ce n'est pas par le président états-unien lui-même… Avec pour conséquence probable la poursuite d'une politique environnementale catastrophique.

Sur quel terreau psychologique prospèrent ces idées inquiétantes? Un manque de modestie, une capacité limitée à séparer les bons arguments des mauvais, une propension à ne chercher que des confirmations de nos croyances et à ne pas nous confronter aux autres, ou encore une attirance pour les milieux sociaux qui nous ressemblent et confortent nos erreurs en les répétant dans d'inlassables caisses de résonance. Tous ces traits et bien d'autres sont naturels, connus et documentés. Tous font partie de notre psychologie ordinaire.

UN MONDE NUMÉRIQUE OÙ L'INFORMATION EST À TRIER

Mais depuis quelques années, parce que nous vivons dans un monde numérique frétillant, rapide, dense et touffu, l'effet de ces pentes cognitives sinistres est démultiplié. Le remède? Sans aucune hésitation, plus d'esprit critique (*voir l'encadré ci-contre*) ; un esprit d'analyse et de réflexion à la hauteur de ce monde de l'opulence informationnelle; un raisonnement, une curiosité et une rigueur suffisants pour contrer l'absence de filtre entre les fournisseurs de récits et leurs destinataires.

Cela fait plus de deux ans que, en France, les instances gouvernementales parlent d'exercer notre esprit critique, mais celui-ci est inscrit dans les programmes scolaires depuis bien plus longtemps, car c'est l'un des piliers d'une citoyenneté éclairée. Certains s'étonnent de cet engouement nouveau qu'ils voient comme une lubie inutile, une mode éphémère. Les enseignants de sciences et de philosophie font valoir qu'ils n'ont pas attendu cet enthousiasme subit pour instruire leurs élèves. Les professeurs de sciences ne font-ils pas chaque jour la démonstration de la méthode scientifique, de la rigueur et d'une réflexion qui caractérisent l'esprit critique? Les professeurs de philosophie n'enseignent-ils pas la pensée analytique que les plus grands penseurs ont développée au fil des siècles?

Malgré la bonne volonté des éducateurs, ces derniers semblent trop optimistes sur les effets de leurs leçons. On ne développe pas bien l'esprit critique des élèves en leur montrant de la science ni en leur faisant découvrir la philosophie de manière traditionnelle. Il faut

QU'EST-CE QUE L'ESPRIT CRITIQUE ?

La pensée critique est au centre de la logique et de l'argumentation d'Aristote (*le personnage central de droite dans le tableau* L'École d'Athènes *de Raphaël, Platon étant celui de gauche*), des règles pour la direction de l'esprit de Descartes et de l'accent sur la preuve et le raisonnement de Hobbes. Elle est aussi au cœur de la science moderne. Dans le domaine de l'éducation, Edward Glaser, de l'université Columbia, à New York, définissait dans les années 1940 la maîtrise de la pensée critique sur la base de trois éléments : premièrement, une prédisposition à considérer les problèmes de manière réflexive, c'est-à-dire en adoptant une attitude sceptique afin d'évaluer le degré de probabilité qu'une croyance soit vraie, en analysant ses fondements et les faits qui l'étayent ; deuxièmement, la connaissance des méthodes de l'investigation et des principes de bon raisonnement ; et troisièmement, la capacité à appliquer ces méthodes. L'esprit critique repose donc sur la volonté d'utiliser certaines connaissances et de le faire de manière experte. Auparavant, le pédagogue américain John Dewey avait déclaré que la capacité de se servir de manière experte de sa pensée réflexive était le véritable but de l'éducation. Mais il était aussi convaincu de la difficulté de l'enseigner, car elle s'oppose à certains penchants naturels de l'enfant, comme son impulsivité.

Plus récemment, psychologues cognitifs et sociaux se sont attachés à définir l'esprit critique en termes de fonctions cognitives. Ce qui émerge de façon générale est que ce n'est pas une aptitude en soi, que l'on pourrait entraîner comme un muscle, mais un ensemble de capacités cognitives et de stratégies à mobiliser de façon raisonnée, autonome et volontaire, pour un objectif précis. Dans les années 2000, un groupe pluridisciplinaire de chercheurs de l'université de Cambridge a proposé de considérer cinq facteurs qui définissent selon eux l'esprit critique : l'analyse, qui est la capacité à percevoir les structures logiques ; l'évaluation, qui permet de juger la fiabilité d'un argument ; l'inférence, la faculté à tirer des conclusions justes ou probables ; la construction, qui est l'élaboration d'un raisonnement ; et enfin l'autocorrection, autrement dit la conscience de nos propres limites.

penser l'éducation à l'esprit critique autrement… et cela a déjà été fait.

DES ATELIERS PHILOSOPHIQUES

En France, plusieurs programmes, récents pour certains, existant depuis plusieurs décennies pour d'autres, se donnent pour objectif de développer l'esprit critique. Quelques-uns prennent place au sein des disciplines existantes et sont donc proposés par des enseignants de sciences ou de philosophie par exemple. D'autres sont au contraire déconnectés des matières académiques. Depuis que le

© POUR LA SCIENCE

ministère de l'Éducation nationale a lancé, in 2016, un ambitieux appel à projets dans ce cadre, les initiatives foisonnent et nous n'en donnons ici que quelques exemples qui en illustrent la diversité.

Organisés le plus souvent par des enseignants de philosophie ou des professeurs de l'école élémentaire, les «ateliers philosophiques» se sont répandus un peu partout (*voir «Sur le web»*). Ils sont souvent mis en place dès le début du primaire et semblent plaire aux enfants. Lors de ces ateliers, l'enseignant se mue en «modérateur» d'un débat entre les élèves. Il n'est plus là pour apporter des informations brutes, mais pour aider les jeunes à argumenter et à débattre à partir d'une question de départ. Par exemple, on lance une discussion pour savoir ce que veut dire «réussir sa vie». Les enfants proposent des idées, souvent contradictoires, qu'ils doivent défendre logiquement, défiant leurs «opposants». Les jeunes apprennent ainsi, espère-t-on, à argumenter correctement, à détecter les failles dans les idées adverses, mais aussi à respecter les opinions d'autrui et à prendre conscience des limites de leurs propres conceptions. Autant d'éléments clés pour l'esprit critique.

D'autres éducateurs ont eu l'idée de se focaliser plutôt sur les compétences liées à la recherche d'information, surtout sur internet et en particulier sur les réseaux sociaux… C'est, en effet, bien l'importance grandissante d'internet qui explique en partie l'explosion récente de croyances irrationnelles et pseudoscientifiques. Apprendre à croiser les données, à en évaluer la fiabilité, à remonter aux sources, est ainsi devenu un enjeu éducatif majeur.

Des enseignants ont mis en place dès l'école élémentaire des ateliers visant à améliorer la recherche et la vérification de données sur internet

Peut-être avez-vous vu passer ces «révélations» pendant la campagne de l'élection présidentielle de 2017: Emmanuel Macron serait financé par l'Arabie saoudite; Jean-Luc Mélenchon se déplacerait en jet privé. Ce ne sont que deux exemples parmi des dizaines de fausses informations (des *fake news*) répandues sur la Toile soit dans un esprit de plaisanterie, soit pour discréditer un candidat… Les internautes sont aujourd'hui soumis à un feu nourri de rumeurs, d'erreurs et de mensonges, parmi lesquels il n'est pas toujours facile de faire le tri.

Dans cette optique d'autodéfense intellectuelle, certains enseignants ont mis en place, dès l'école élémentaire, des ateliers visant spécifiquement à améliorer la recherche et la vérification de données sur internet. La professeuse des écoles Rose-Marie Farinella est par exemple intervenue chaque semaine dans une classe de CM2, où les élèves ont joué les journalistes d'investigation à la recherche de la vérité… Certains ont ainsi découvert avec étonnement que les *illuminatis* ne gouvernent finalement pas le monde dans l'ombre et que beaucoup de photos d'extraterrestres sont des montages (ou, plus curieusement, des images réelles de fœtus de paresseux).

LA ZETETIQUE OU L'ART DU DOUTE RAISONNABLE

Difficile de ne pas mentionner ici un précurseur des projets français actuels, le physicien Henri Broch, qui lança dans les années 1980 le premier cours de «zététique». Par ce nom sibyllin, Henri Broch et ses successeurs désignent, *grosso modo*, l'art du doute raisonnable et de la méthode scientifique, autrement dit l'esprit critique. La zététique a toutefois deux particularités par rapport aux projets plus récents. D'abord, cette discipline met l'accent sur ce que les psychologues appelleraient la «métacognition», c'est-à-dire la connaissance de nos propres biais, des risques que notre pensée imparfaite nous fait courir sur le chemin de la vérité. C'est un choix discutable, mais la zététique a ainsi donné de nouveaux noms, plus ergonomiques, à des défauts de l'esprit humain bien connus des psychologues.

Par exemple, le sophisme qui consiste à penser que si deux événements se suivent, le premier est la cause du second, que l'on nomme habituellement «post hoc», est en zététique «l'effet atchoum». Imaginez en effet la stupeur de celui qui aurait éternué quelques fractions de seconde avant l'explosion de la gare centrale de Bruxelles le 20 juin 2017… Il aurait pu un moment avoir l'illusion que son éternuement était la cause de la déflagration.

Autre particularité: la zététique se concentre historiquement sur l'étude rationnelle des phénomènes supposés paranormaux. >

On montre volontiers comment raisonner, tester expérimentalement et rechercher des informations dans des domaines étranges, allant du monstre du Loch Ness à la télépathie, plutôt que sur des questions de société. D'une part, cela a l'avantage de rendre le matériel discuté peu chargé émotionnellement pour la plupart des élèves et des étudiants ; d'autre part, cela donne une coloration ludique et attrayante à l'exercice.

L'idée de la zététique s'est largement développée et élargie depuis trente ans et de nombreux groupes et associations s'en réclament désormais. Elle a inspiré des ateliers et des cours, notamment ceux organisés à Grenoble par le Cortecs, dont le site regorge de matière pédagogique stimulante (*voir « Sur le web »*).

Ces initiatives, et d'autres encore, sont remarquables, mais sont-elles efficaces ? La bonne volonté des enseignants ne garantit malheureusement pas l'utilité de leur activité. Appliquons comme il se doit l'esprit critique à l'éducation de l'esprit critique : demandons des preuves tangibles ! Dans les cas cités ci-dessus, aucune donnée ne permet hélas de mesurer l'impact des interventions, car les analyses n'ont pas été menées, en dehors d'enquêtes qualitatives qui suggèrent que les élèves sont satisfaits – ce qui est déjà positif, mais insuffisant pour trancher. En attendant que la recherche s'empare de cette question, nous pouvons nous tourner vers d'autres travaux qui, au niveau international, ont déjà évalué le résultat de projets similaires.

DES SUCCÈS AVÉRÉS

Un cas de succès souvent cité nous vient d'Amérique latine. Dans les années 1980, au Venezuela, dans tout le pays, on a intégré l'enseignement des capacités de la pensée aux programmes scolaires, avec le projet Intelligence. Les élèves, quel que soit leur âge, recevaient des leçons hebdomadaires de trente minutes sur les bases du raisonnement, de la pensée créative, la résolution de problèmes et l'analyse du langage. Cet enseignement a fait l'objet d'une étude d'impact avec des élèves de 13 ans environ. Ainsi, le groupe de jeunes l'ayant suivi a obtenu, par rapport à un groupe témoin analogue n'ayant pas reçu ce cours, de meilleurs résultats à des tests évaluant notamment la capacité à raisonner, la créativité et l'argumentation. L'étude ayant dû s'arrêter, on n'a pas mesuré les gains à long terme, mais les données à court terme sont prometteuses.

Un autre critère fondamental pour évaluer l'enseignement de l'esprit critique est la transférabilité dans des situations diverses de la vie de tous les jours. En effet, il ne suffit pas que les élèves développent la capacité à utiliser le raisonnement, à estimer la fiabilité des sources ou à imaginer des explications alternatives dans des cas semblables à ceux qu'ils ont déjà rencontrés en cours. Il faut aussi, d'une part, qu'ils soient capables d'appliquer ces outils mentaux dans des situations quotidiennes variées, et, d'autre part, qu'ils le fassent spontanément quand cela est nécessaire. C'est tout le problème du « transfert » bien connu des éducateurs. Or l'étude d'impact du programme Intelligence ne permet pas de savoir si un tel transfert a eu lieu.

En revanche, le psychologue social Richard Nisbett, de l'université du Michigan à Ann Arbor, et ses collègues ont pris en compte la question du transfert dans leurs expériences. Dans l'une d'elles, ils ont utilisé une méthode originale pour déterminer si certains éléments de la boîte à outils de l'esprit critique seraient spontanément réutilisés. Après avoir soumis des étudiants de l'université du Michigan à un cours sur le raisonnement statistique, les chercheurs ont téléphoné aux étudiants, *incognito*. Prétextant un sondage concernant notamment le sport sur le campus, ils ont posé aux jeunes quelques questions étranges destinées à tester leur propension à utiliser le raisonnement statistique correct appris en cours. Ces questions étaient mêlées à d'autres plus ordinaires, pour éviter qu'ils ne se doutent du but réel de l'entretien téléphonique.

Voici l'une de ces questions : « En général, l'équipe de baseball qui remporte le match de l'année a tendance à être moins performante l'année suivante. Cela est clair sur les dix dernières années. Huit équipes gagnantes ont fait moins bien l'année suivante, seules deux ont fait au moins aussi bien. Au niveau national, c'est neuf fois sur dix que l'équipe gagnante a baissé en performance l'année suivante. À votre

Les interventions pédagogiques augmentent, en moyenne, l'esprit critique des élèves

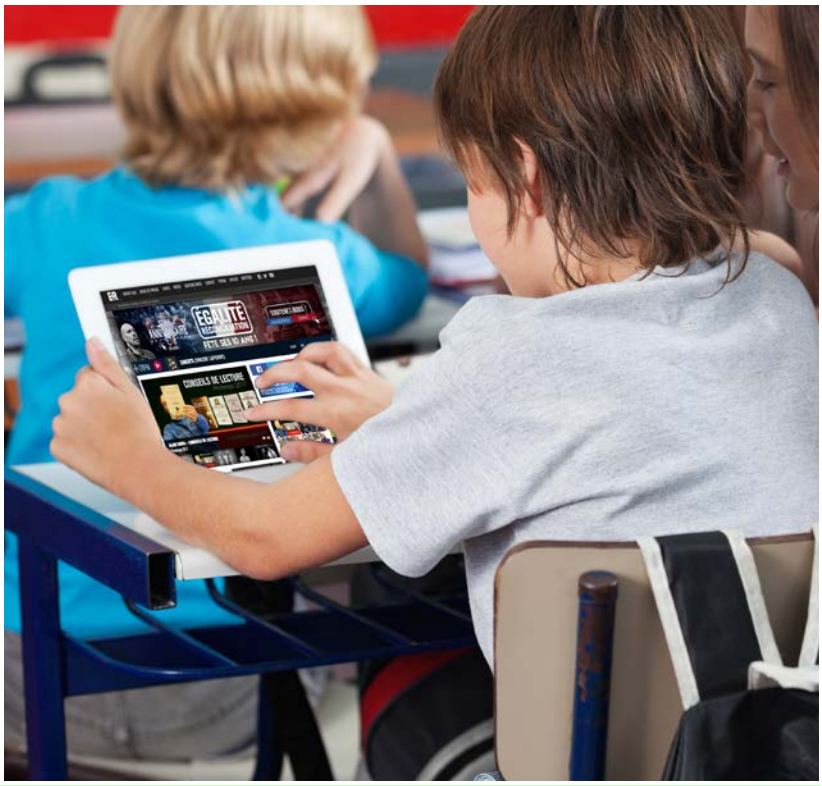
SUR LE WEB

Le site *Esprit critique info*, pour une approche scientifique de l'esprit critique :
http://espritcritique.info

Site du Clemi (Centre pour l'éducation aux médias et à l'information) :
www.clemi.fr

Site de Rose-Marie Farinella, qui anime des ateliers d'éducation aux médias et à l'information :
https://rosefarinella.wordpress.com/author/rosefarinella/

Site du Cortecs (Collectif de recherche transdisciplinaire esprit critique & sciences) :
https://cortecs.org/



Comment cet enfant peut-il savoir si le site internet qu'il consulte fournit des informations fiables ? Éduquer les jeunes à l'utilisation d'internet et des réseaux sociaux est crucial pour qu'ils aient un minimum de méfiance et ne prennent pas pour argent comptant tout ce qu'ils lisent en ligne.

BIBLIOGRAPHIE

S. Delouvée et N. Gauvrit (sous la dir. de), **Des têtes bien faites**, PUF, 2019.

E. Pasquinelli *et al.*, **Esprit scientifique, esprit critique**, Le Pommier, 2017.

D. T. Willingham, **Critical thinking**, *American Educator*, vol. 31, pp. 8-19, 2007.

D. F. Halpern, **Thought and Knowledge : An Introduction to Critical Thinking**, Routledge, 2002.

avis, pourquoi ces équipes ont-elles tendance à avoir de moins bons résultats l'année suivant leur victoire ?»

TRANSFERER SES CONNAISSANCES

Si vous aviez suivi le cours de l'université du Michigan, vous sauriez sûrement reconnaître ici un phénomène de «régression vers la moyenne»: pour un score partiellement dû au hasard, si on se trouve très haut ou très bas à un moment donné, on a tendance ensuite à se rapprocher de la moyenne. Si les gagnants font souvent moins bien la fois suivante, c'est parce qu'ils triomphent quand ils sont au mieux de leurs performances. De même, si vous avez une note exceptionnellement élevée à un examen quelconque, il est probable que la note suivante soit plus basse (et c'est certain si vous avez obtenu la note maximale la première fois). C'est un simple phénomène mathématique, mais il n'est pas très intuitif!

Or les étudiants qui avaient suivi les cours de raisonnement statistique ont souvent spontanément répondu en citant ce phénomène de régression vers la moyenne, ce que les autres faisaient plus rarement. Ces derniers invoquaient par exemple le fait de se reposer sur ses lauriers ou d'avoir trop confiance en soi. Cela montre bien, au moins dans ce cas, que les outils de raisonnement appris en classe sont ensuite disponibles dans d'autres contextes et sont bien transférés.

Nous avons cité deux exemples d'études d'impact, mais il y en a bien d'autres. Plusieurs chercheurs ont même réalisé des méta-analyses portant parfois sur plus de cent études, et un tableau commence à émerger, même s'il reste beaucoup à faire pour trouver la meilleure manière de développer l'esprit critique. La bonne nouvelle est que les interventions pédagogiques fonctionnent dans l'ensemble. Pas autant qu'on le souhaiterait, certes, mais elles augmentent en moyenne l'esprit critique, c'est-à-dire les capacités à raisonner, analyser les arguments, percevoir les structures logiques, évaluer la fiabilité d'une information. L'effet est «moyen» selon les critères de la psychologie, mais il n'est pas nul.

QUELQUES REGLES A SUIVRE

Quelles sont donc les caractéristiques de l'enseignement le plus efficace? Parmi les facteurs étudiés, deux ressortent distinctement. Premièrement, pour que l'enseignement soit efficace, il doit être explicite. Cela signifie que l'on doit dire aux élèves pourquoi et comment ils vont développer leur esprit critique. C'est pourquoi les enseignants de sciences et de philosophie, qui pensent développer implicitement les capacités de réflexion de leurs élèves par le fait qu'ils leur montrent l'exemple, n'obtiennent pas d'excellents résultats.

Second point important: il faut favoriser le transfert. Pour ce faire, plusieurs solutions sont envisageables. Une première consiste à multiplier les exemples dans des domaines variés: on montre comment évaluer la fiabilité d'une source concernant un article politique, un autre traitant d'écologie, un troisième portant sur le sport... Une seconde possibilité consiste à travailler sur du matériel abstrait. Par exemple, imaginer des leçons de logique formelle ou de psychologie dressant la liste des risques d'erreurs de jugement liés à la psychologie ordinaire.

Développer l'esprit critique des jeunes est donc possible... et vraisemblablement indispensable pour former des citoyens responsables. Se fier à l'intuition des enseignants ne suffit pas, il faut aussi appliquer l'esprit critique à l'éducation de l'esprit critique, chercher de manière raisonnée et empirique les meilleures stratégies possible à mettre en place dans les écoles. Le foisonnement d'idées et de projets innovants qui ont récemment éclos en France offre une occasion inédite de tester à grande échelle différentes pistes pour que la prochaine génération soit plus rationnelle que la précédente, et puisse mieux résister sur le champ de bataille idéologique des réseaux sociaux. ■

L'ESSENTIEL

- Avant le développement de la mécanique newtonienne, les savants n'étaient pas en mesure de décrire la trajectoire d'un corps en chute libre sur la Terre et de dire si cette chute déviait de la verticale.
- Les premières expériences ont donné des résultats parfois contradictoires. Mais les travaux théoriques de Laplace et de Gauss ont montré que la déviation vers le sud était négligeable, contrairement à celle vers l'est. Cela a finalement été confirmé.
- Des physiciens s'intéressent encore à la question, en utilisant des descriptions plus réalistes de la Terre.

L'AUTEUR

RICHARD TAILLET
professeur de physique à l'université Savoie Mont Blanc et au LAPTh, à Annecy-Le-Vieux

Chute libre, histoire d'une déviation

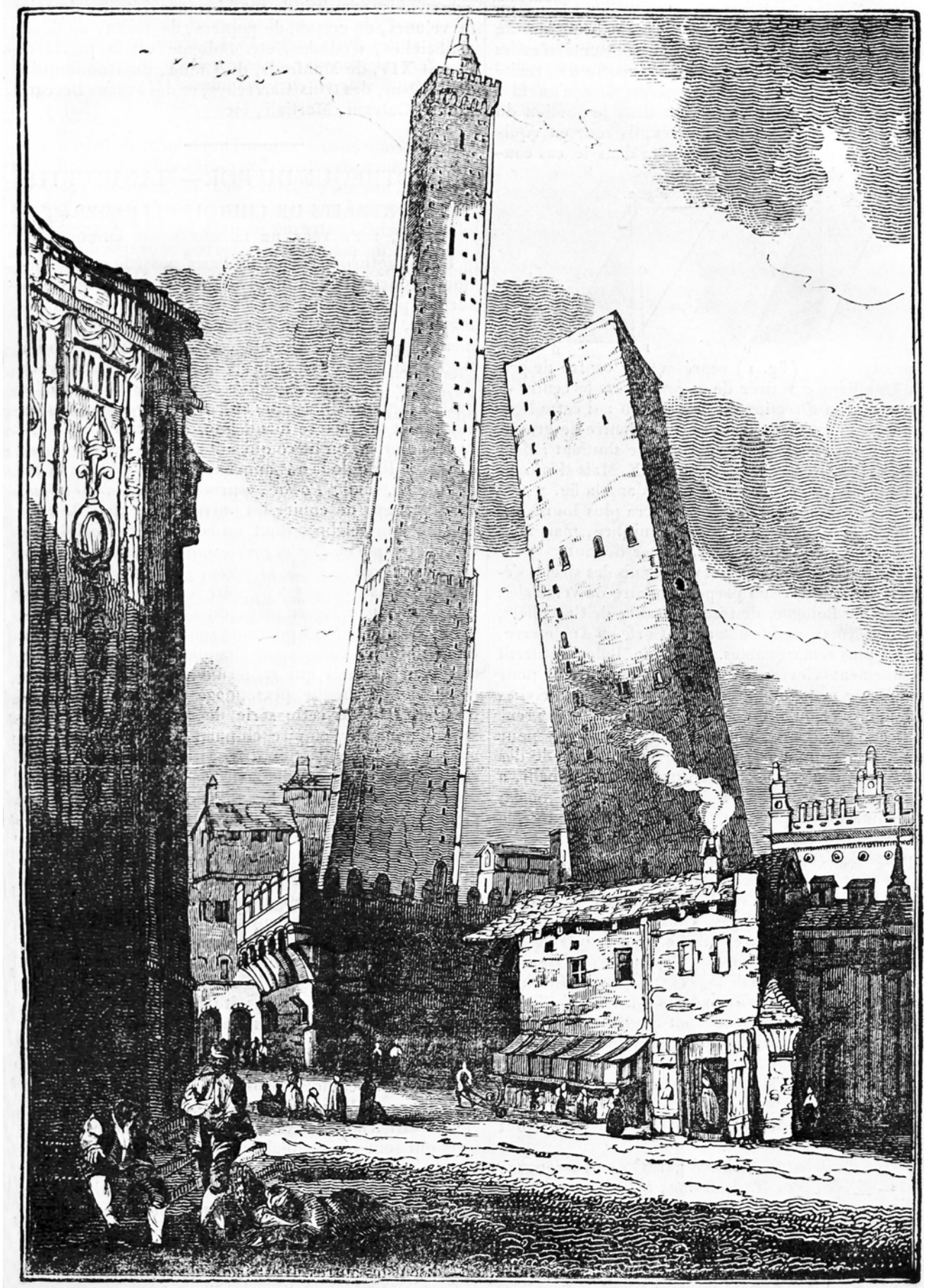
Lâcher des objets du haut de tours ou dans des puits de mine : une expérience maintes fois répétée par des savants désireux de déterminer si leur chute était déviée vers l'est et vers le sud. La question intéresse encore les physiciens d'aujourd'hui.

En 1903, le physicien américain Edwin Hall commençait par ces mots un article consacré à la chute des corps : « La question de savoir si une sphère lâchée d'une hauteur de quelques centaines de pieds s'écarte légèrement vers le sud de la direction d'un fil à plomb n'est peut-être pas l'un des problèmes les plus importants ni les plus urgents de la physique, mais elle a la dignité d'un âge vénérable et le charme du mystère. » Mystère en effet, car au cours des siècles précédents, les expériences conduisaient à des résultats contradictoires et seule une compréhension fine des lois de la gravitation a permis d'y voir clair. L'exercice est devenu un grand classique pour les étudiants, et des physiciens continuent de modéliser de façon plus précise la chute d'un corps s'il pouvait traverser librement la Terre.

Plusieurs siècles avant la remarque d'Edwin Hall, la question de savoir si un corps en chute libre s'éloigne de la verticale revêtait une importance fondamentale sur le plan cosmologique : les savants espéraient utiliser cette observation pour prouver que la Terre tourne sur elle-même. Déjà, alors qu'il rédigeait *De Revolutionibus*, publié en 1543 et dans lequel il développait l'hypothèse héliocentrique, Nicolas Copernic avait saisi toute l'importance de bien comprendre la chute des corps. En effet, certaines des critiques qui lui étaient adressées argumentaient que la Terre ne pouvait pas être animée d'un mouvement de rotation, car cela aurait des conséquences spectaculaires (et non observées). Par exemple, selon ces critiques, une balle lâchée du haut d'un mât devrait atterrir plusieurs centaines de mètres à l'ouest de son point de lâcher, le mât et son support étant emportés par le mouvement de la Terre mais pas la balle, qui resterait en arrière.

Copernic lui-même, puis des coperniciens comme Thomas Digges ou Giordano Bruno, prirent grand soin de désamorcer ces objections en attribuant au projectile un mouvement circulaire (celui du point de lâcher) en plus de son mouvement vertical. Galilée, en particulier, s'efforça d'expliquer qu'une balle lâchée du haut d'un mât en mouvement est une balle lancée à la vitesse du mât, du point de vue d'un observateur qui ne participe pas au mouvement >

Bologne présente deux tours penchées, symboles de la ville : Asinelli (97 mètres de hauteur) et Garisenda (48 mètres). À l'intérieur de la première, Giovanni Guglielmini a étudié en 1791 la chute des corps et leur déviation de la verticale.



de la Terre (je l'appellerai l'observateur «fixe» dans la suite). Elle doit donc avancer horizontalement à la vitesse du mât avant d'atteindre le sol. Galilée évoqua aussi, dans son *Dialogue sur les deux systèmes du Monde* (1632), la possibilité que la balle se déplace plus rapidement que le sol (car le sommet du mât avance plus vite que le sol, puisqu'il est plus loin du centre de rotation) et l'atteigne à l'est du mât plutôt qu'à son pied. Mais le savant n'argumenta pas de façon très enthousiaste, tant l'effet lui apparaissait comme une conséquence erronée d'un mauvais raisonnement.

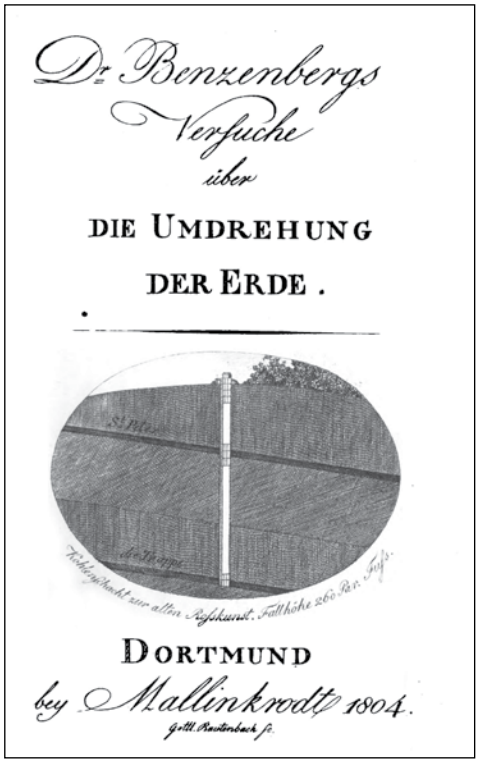
DES RAISONNEMENTS PRÉNEWTONIENS

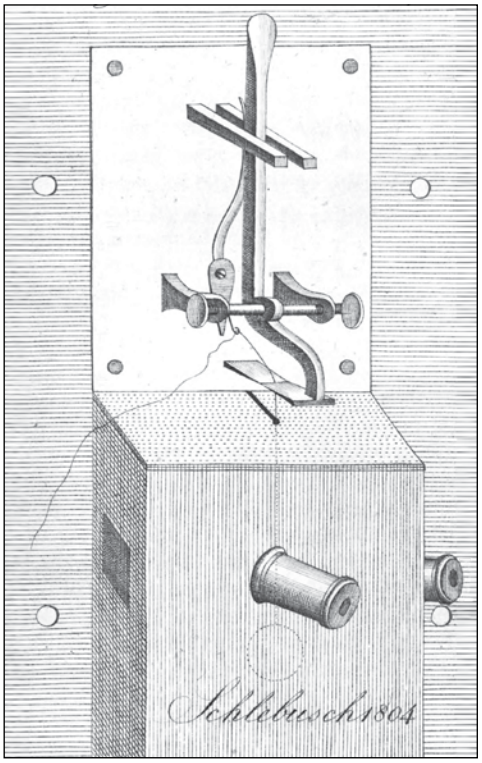
En 1679, dans une lettre adressée à Robert Hooke, Isaac Newton revint sur cette idée et montra que si la Terre tourne sur elle-même, la trajectoire d'une balle qui tombe doit être déviée vers l'est. Il comprit alors que l'expérience de chute libre était un moyen de mettre en évidence la rotation de la Terre de façon expérimentale. Cette question était un enjeu fondamental au XVIIe siècle, période qui vit notamment la condamnation de Galilée par l'Église pour ses convictions héliocentriques (mais où le Londres de Newton autorisait plus de libertés dans l'exploration de ces idées que l'Italie de Galilée).

Toutefois, la description de la chute d'un corps dépend beaucoup de la compréhension que les physiciens ont de la façon dont la vitesse horizontale de l'objet évolue au cours de la chute. Il était déjà possible de la déduire à partir de la loi des aires, énoncée quelques décennies plus tôt par Johannes Kepler dans le cadre du mouvement des planètes (elle stipule que le segment reliant le Soleil à une planète sur sa trajectoire balaie des aires égales en des temps égaux). Mais personne à cette époque n'avait imaginé que ces lois, relatives au mouvement des corps célestes, pouvaient avoir la moindre pertinence pour comprendre la chute des corps sur Terre.

De façon plus générale, la compréhension de la chute des corps demande de disposer de la notion d'inertie, de comprendre le concept de force et de maîtriser la notion de changement de référentiel. Malgré les avancées conceptuelles auxquelles il a contribué, ce n'était pas le cas de Galilée. Par exemple, pour lui, un corps lâché du haut d'une tour et qui serait libre de traverser la Terre décrirait (pour un observateur «fixe») un grand arc de cercle (*voir la figure page ci-contre*) qui l'amènerait exactement au centre de la Terre; l'hypothèse était astucieuse à plusieurs égards (elle a notamment pour conséquence que les corps sont uniformément accélérés vers le bas, pour l'observateur terrestre, en accord avec les observations), mais totalement déconnectée de toute notion de dynamique.

Ce n'était pas le cas de Newton non plus en 1679 (des années avant la publication de ses *Principia Mathematica*), qui imaginait plutôt une trajectoire en spirale, résultant de la composition d'un mouvement circulaire uniforme





Lors de sa seconde série d'expériences, en 1804, Johannes Friedrich Benzenberg a utilisé un puits de mine à Schlebusch, en Allemagne, d'une hauteur de 84 mètres *(figuré à gauche)*. Il a aussi perfectionné son dispositif de lâcher des masses *(à droite)* afin de ne pas communiquer à l'objet une vitesse latérale au moment de son lâcher. En accord avec les calculs de Laplace et Gauss, Benzenberg a trouvé une déviation vers le sud quasi nulle.

Les résultats de Hall ont marqué la fin des expériences sur la déviation vers le sud

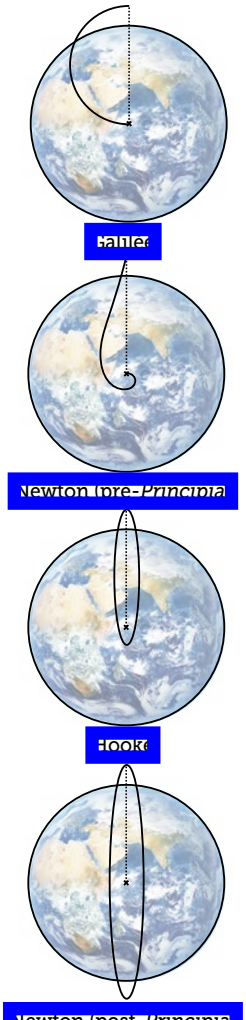
t d'un mouvement radial accéléré, spirale qui boutit également au centre de la Terre.

Le questionnement de Newton faisait écho à celui qu'avait déjà mené Hooke quelques années auparavant. Ce fut le point de départ d'une correspondance entre les deux hommes sur la question de la trajectoire d'un corps en chute libre sur une Terre en rotation.

Hooke exprima son désaccord avec les conclusions de Newton: pour lui, la trajectoire n'était ni un arc de cercle ni une spirale, mais une ellipse (l'avenir lui donnera partiellement raison sur ce point, même s'il s'agissait pour lui davantage d'une intuition éclairée que d'une véritable démonstration), et la chute devait s'accompagner d'une déviation vers le sud, plus importante que la déviation vers l'est. En 1680, Hooke affirma même avoir observé ces deux déviations en étudiant la chute de corps sur une hauteur de 8 mètres, mais il ne put reproduire ces expériences devant la Royal Society lorsqu'elle le lui demanda.

En 1726, Newton dévoila la version aboutie de sa théorie de la gravitation universelle dans sa troisième édition des *Principia Mathematica*: tous les corps s'attirent selon une force qui décroît avec la distance qui les sépare (la paternité de cette idée sera au cœur d'une des guerres que se livrèrent Hooke et Newton). L'objet lâché du haut du mât ne se dirige plus vers le centre de la Terre parce que c'est son lieu naturel, conformément à la vision aristotélicienne, mais subit une force dirigée vers le centre de la Terre, lieu moyen de l'attraction de toutes les parties composant la planète. Il en découle notamment que l'objet n'atteint jamais le centre de la Terre et, dans le cas d'une Terre de densité homogène et sphérique, décrit une ellipse de même centre que la Terre (pour Hooke, l'ellipse était décentrée).

À ce moment de l'histoire, les lois de la mécanique newtonienne fournissaient tous les éléments pour que l'influence de la rotation de la Terre sur la chute des corps puisse être étudiée de façon rigoureuse, une bonne fois pour toutes:



À quoi ressemblerait la trajectoire d'un objet en chute libre qui pourrait voyager à l'intérieur de la Terre considérée comme homogène? Galilée a proposé un arc de cercle, Newton une spirale et Hooke avait comme intuition une ellipse décentrée. En découvrant les lois de la gravitation, Newton a montré que la bonne solution est proche d'une ellipse centrée.

on peut calculer exactement la trajectoire dans le référentiel non tournant et en déduire la trajectoire dans le référentiel terrestre et donc la déviation par rapport à la verticale. Toutefois, ce n'est pas ainsi que les choses se sont passées. Plus précisément, il ne se passa rien pendant un siècle. Newton lui-même ne chercha pas à approfondir ce sujet, en partie parce qu'il s'était activement éloigné de ce qui pouvait le mener à des conflits avec ses pairs. Ses premiers partisans ne se passionnèrent pas non plus pour cette affaire de déviation vers l'est et vers le sud, plus occupés à défendre la mécanique de Newton contre celle de Descartes, qui, dans le cadre de sa propre théorie de la gravitation, prévoyait un aplatissement plutôt au niveau de l'équateur qu'aux pôles sous l'effet de la rotation de la Terre.

Un siècle plus tard, en 1791, l'Italien Giovanni Guglielmini se saisit de la question et réalisa plusieurs expériences de chute beaucoup plus minutieuses que celles de Hooke, en faisant chuter des objets d'une hauteur de 78 mètres depuis la tour Asinelli, à Bologne (*voir l'image page 75*). Son objectif n'était plus de montrer la rotation de la Terre (alors bien admise depuis que l'héliocentrisme copernicien avait définitivement pris le pas sur le géocentrisme), mais de vérifier quantitativement les lois de la mécanique de Newton. Il prit notamment soin de faire ses expériences par atmosphère calme, mit au point un système de lâcher qui limitait les vitesses latérales initiales des billes et repéra les points d'impact au microscope. Il trouva une déviation vers l'est de 1,9 centimètre et vers le sud de 1,2 centimètre.

UNE MESURE DIFFICILE

Malheureusement, l'intérêt de ces mesures fut fortement diminué du fait qu'il ne put déterminer la position de référence (le point où tomberaient les billes si elles n'étaient pas déviées) que six mois après les expériences de lâcher et il est probable que le dispositif ait subi des changements au cours de cette période. Ce délai s'explique par la difficulté de cette détermination: il faut repérer la position d'équilibre d'un fil à plomb, c'est-à-dire d'un pendule de 78 mètres de long. On imagine aisément que la moindre vibration ou le moindre courant d'air empêchent le système d'être à l'équilibre. Il faut attendre des conditions atmosphériques particulièrement calmes, non pas sur une échelle de quelques secondes comme pour les chutes, mais de plusieurs jours.

Quelques années plus tard, Johann Friedrich Benzenberg, astronome, géologue et physicien allemand, commença à son tour à s'atteler sérieusement au problème, grâce à deux séries d'expériences. Dans la première, en 1802, il lâcha 31 billes d'une hauteur de 76 mètres depuis la tour de l'église Saint-Michel, à Hambourg. Il trouva des déviations comprises

entre 2,8 centimètres vers l'ouest et 4,7 centimètres vers l'est, et comprises entre 2,3 centimètres vers le nord et 3,7 centimètres vers le sud. Ces mesures étaient très dispersées, mais elles semblaient présenter une asymétrie : la moyenne indiquait une déviation de 9 millimètres vers l'est et de 3,3 millimètres vers le sud. Benzenberg sollicita l'aide de Heinrich Olbers, astronome dont le nom aujourd'hui est attaché au paradoxe de la nuit noire (qui se résume à cette question : si l'Univers est statique et infini, il est rempli d'une infinité d'étoiles, alors pourquoi le ciel nocturne est-il noir ?), pour interpréter ces résultats, c'est-à-dire pour obtenir des valeurs théoriques auxquelles les comparer.

Olbers étudia la question et la soumit à son tour à Carl Friedrich Gauss, un des grands mathématiciens de l'époque. L'astronome et physicien français Pierre-Simon de Laplace s'y intéressa aussi, probablement aiguillonné par l'intérêt de Gauss : ils étaient habitués à se trouver en compétition sur des points scientifiques. Ils furent amenés, en décrivant le mouvement de chute dans le référentiel terrestre tournant, à détailler un effet subtil que le mathématicien et ingénieur français Gustave Coriolis retrouva quelques décennies plus tard et que l'on nomme aujourd'hui « force de Coriolis ».

Il s'agit du fait que la trajectoire d'un corps qui se déplacerait en ligne droite, à vitesse constante, dans un référentiel « fixe », est perçue comme courbe pour un observateur attaché à un référentiel tournant. Cet observateur interprète cette courbure comme étant l'effet d'une force (la force de Coriolis), que certains tiennent à qualifier de fictive, au même titre que la force centrifuge, car elle ne se manifeste pas dans le référentiel « fixe ». C'est précisément cette propriété qui en fait une excellente sonde du caractère tournant ou non d'un référentiel ; c'est grâce à elle que le pendule de Foucault (1851) met en évidence la rotation de la Terre sur elle-même.

L'INFIME DÉVIATION VERS LE SUD

En 1803, en étudiant la chute des corps sous l'action de leur poids, de la force centrifuge et de la force de Coriolis, Gauss et Laplace parvinrent à une formule similaire à celle que l'on enseigne encore de nos jours concernant la déviation vers l'est. Pour la déviation vers le sud, Laplace ne prédit « aucune déviation sensible », tandis que Gauss fournit une expression analytique donnant des valeurs non nulles mais très faibles. Pour une chute de 76 mètres comme dans l'expérience de Benzenberg, Gauss obtint une déviation théorique de 8 millimètres vers l'est et de 1 micromètre vers le sud. Si la première valeur est en accord avec la valeur expérimentale de 9 millimètres obtenue par Benzenberg, la seconde ne l'est pas du tout : la valeur mesurée de la déviation vers le sud est

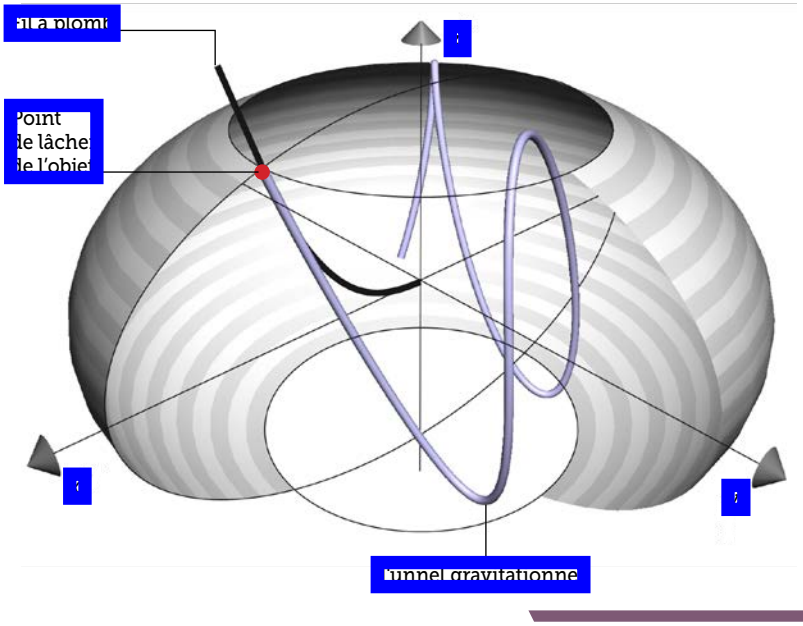
VOYAGE AU « CENTRE DE LA TERRE » DANS UN TUNNEL GRAVITATIONNEL

On appelle « tunnel gravitationnel » la forme du puits qui [illegible] pour qu'un corps lâché depuis son ouverture tombe sans jamais toucher les parois.

La première chose à noter est que le calcul d'une trajectoire dans l'intérieur de la Terre diffère de celui d'une trajectoire au-dessus de la surface. En effet, les lois de la gravitation indiquent que les parties de la Terre situées à un rayon supérieur à la distance entre le centre de la Terre et l'objet exercent une attraction globale nulle. Il faut donc recalculer la part de masse active en chaque point de la trajectoire dans la Terre, ce qui n'est pas le cas en surface où toute la Terre contribue.

Dans le cas où la Terre est considérée comme parfaitement sphérique, homogène et sans rotation, et où les frottements avec l'air sont négligeables, le tunnel gravitationnel serait rectiligne et relierait le point de départ au point situé à l'antipode. L'objet lâché à l'entrée du tunnel oscillerait entre ces deux points en atteignant une vitesse maximale au centre de la planète. La rotation de la Terre, responsable pour les observateurs qui tournent avec elle de la « force de Coriolis », induit une déviation vers l'est et vers le sud. On montre alors, toujours pour une planète sphérique, que le tunnel est un peu courbé et aboutit à un point situé à quelques milliers de kilomètres à l'ouest du point antipodal. Si ces tunnels devaient être construits et utilisés pour voyager d'un point du globe à un autre, ils ne pourraient être utilisés que dans un sens !

Du fait de sa rotation, la Terre n'est pas sphérique mais aplatie aux pôles. En 2018, je me suis intéressé à la forme de ces tunnels en prenant en compte cette déformation. Le premier résultat étonnant est que la plupart des calculs sont assez simples, accessibles à un étudiant en licence, si l'on prend soin de se placer du point de vue d'un observateur « fixe ». Le second concerne la forme des tunnels : ceux-ci sont entièrement contenus à l'intérieur de la Terre. Ouverts à une extrémité (celle où le corps est lâché), ils ne débouchent nulle part ailleurs à la surface de la Terre (*voir la figure ci-dessous*).



totalement inexpliquée. Au passage, Gauss et Laplace montrèrent que le frottement de l'air a peu d'influence sur la déviation vers le sud.

Piqué par ces résultats, Benzenberg affina ses expériences en 1804 en utilisant pour la chute un puits de mine à Schlebusch (84 mètres, *voir la figure page 76*) et en améliorant le dispositif de lâcher des billes, pour limiter une éventuelle vitesse initiale latérale qui biaiserait les mesures. Cette fois, en sélectionnant parmi ses mesures celles qui lui semblaient avoir été prises dans les conditions les plus fiables, ses résultats ne montrèrent pas de déviation vers le sud.

Tout serait finalement assez simple si l'histoire s'arrêtait là. Mais non. Le chimiste allemand Ferdinand Reich, en 1831, et d'autres renouvelèrent l'expérience, avec des hauteurs de chute allant jusqu'à 400 mètres. Ils mirent clairement en évidence une déviation vers le sud incompatible avec les résultats de Gauss et Laplace. Le problème était assez étonnant pour que des explications non gravitationnelles soient avancées. Par exemple, dans les années 1840, le Danois Hans Christian Œrsted et le Britannique John Herschel proposèrent que dans les billes en métal utilisées, des courants induits dus à l'interaction avec le champ magnétique terrestre soient responsables de la déviation vers le sud.

L'EXPÉRIENCE DÉFINITIVE

Au début du xxe siècle, Edwin Hall, évoqué dans l'introduction, celui-là même qui donna son nom à un effet de déviation des électrons dans un conducteur en présence d'un champ magnétique, se pencha à son tour sur cette question avec une approche expérimentale différente et que l'on pourrait qualifier de plus moderne. Plutôt que d'augmenter encore la hauteur de chute, il préféra se placer à une hauteur modeste (23 mètres, dans la tour du laboratoire de physique Jefferson, à l'université Harvard, aux États-Unis), mais dans des conditions qui lui permettaient de contrôler les incertitudes expérimentales (pas de courants d'air, pas de différence de température entre les parois intérieures de la tour, etc.). Il obtint ainsi la première mesure de la déviation vers l'est affectée d'incertitudes expérimentales inférieures à la valeur mesurée. Cette mesure était en accord avec la prédiction de la mécanique newtonienne, calculée par Gauss et Laplace. Les déviations vers le sud qu'il observa étaient dans la limite des erreurs expérimentales, c'est-à-dire compatibles avec une déviation nulle.

Satisfait de ces résultats, Hall s'avoua toutefois impuissant à expliquer l'ensemble des déviations vers le sud observées par ses prédécesseurs, ce qu'il considéra comme une véritable énigme. L'erreur était certainement expérimentale, mais, faute de pouvoir assister aux expériences, les historiens des sciences disposent de peu d'indices pour le confirmer.

Les résultats de Hall ont marqué la fin de l'approche expérimentale du problème de la déviation vers le sud, mais ils ont coïncidé avec le début d'un renouveau d'intérêt théorique, et ce pour plusieurs raisons.

D'une part, la définition de la déviation vers le sud est assez subtile. Lorsqu'un corps chute et atteint le fond du puits, à partir de quel point de référence doit-on mesurer une déviation ? Expérimentalement, ce point peut être matérialisé par un fil à plomb sans mouvement, une masselotte accrochée au bout d'un fil attaché au point de lâcher. Or, dans la Terre en rotation, le fil à plomb, s'il est assez long et si le fil est de masse négligeable, n'indique pas la direction de la pesanteur au point d'attache, mais celle au niveau de la masselotte (pire, il n'est pas rectiligne si la masse du fil est prise en compte, car il est soumis à la force centrifuge et à une force de gravitation qui évoluent tout le long du fil). Une évaluation correcte de la déviation vers le sud doit en tenir compte. Ce n'est qu'en 1911 que le mathématicien américain William Roever souligna clairement cette subtilité.

D'autre part, la valeur de la déviation vers le sud est sensible à la façon dont le champ de pesanteur évolue au cours de la chute, en intensité et en direction, c'est-à-dire qu'elle est sensible à la forme de la Terre (son léger aplatissement aux pôles, par exemple) et à la façon dont sa masse volumique augmente avec la profondeur, paramètres qui relèvent des géosciences.

Enfin, si l'on s'intéresse aux situations proches de la réalité expérimentale, le problème fait apparaître deux paramètres que l'on peut considérer comme petits : la vitesse de rotation de la Terre est faible devant le temps qu'il faudrait au projectile pour la traverser de part en part et, dans les expériences réelles, les hauteurs de chute sont faibles devant le rayon de la Terre. Dans cette situation, les physiciens sont tentés de simplifier les équations pour en trouver des solutions approchées. Mais la procédure est assez délicate et les physiciens ont parfois été en désaccord sur la façon de le faire (techniquement, sur la façon de calculer un développement limité à deux paramètres).

Ces subtilités font du problème de la chute libre une question sur laquelle des physiciens reviennent régulièrement, pour en proposer des variantes, des solutions plus complètes, avec des hypothèses plus réalistes sur la forme ou la composition de la Terre, ou simplement pour aborder ce vénérable problème sous un angle nouveau (*voir l'encadré page ci-contre*). Ils le font généralement en marge de leur activité de recherche quotidienne, pour satisfaire un aspect de leur métier que l'on met trop rarement en avant : le plaisir d'explorer les lois de la physique, celui-là même qui transparaît dans les propos de Hall cités au début de cet article. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Taillet, **Free falling inside flattened spheroids : gravity tunnels with no exit**, *Amer. J. of Physics*, vol. 86, pp. 924-933, 2018.

A. Koyré, **Chute des corps et mouvement de la Terre**, Vrin, 1973.

A. Armitage, **The deviation of falling bodies**, *Annals of Science*, vol. 5(4), pp. 342-351, 1947.

E. H. Hall, **Do falling bodies move south ?**, *Physical Review*, vol. 7, pp. 179-190, 1903.

L'OFFUSCATION OU L'ART DE BROUILLER L'ÉCOUTE

Puisque les espions ou les marchands veulent en savoir trop sur vous, donnez-leur satisfaction en les laissant s'emparer d'informations nombreuses… et fausses !

RENDEZ-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'AUTEUR

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

Agacé par une publicité que je vois pour la énième fois sur le site d'actualités que je consulte, je clique dessus, je pousse dans un coin de mon écran d'ordinateur la fenêtre qui s'ouvre (de façon à cacher son contenu à mon regard), puis, [illegible] fenêtre dont je n'ai rien vu. Mon but est de fausser les informations que les systèmes qui me surveillent auront de moi, et de faire payer pour ce clic l'entreprise qui m'importune avec ses publicités (plus on clique sur une publicité en ligne, plus cela coûte à celui qui la propose). Ce que je viens de faire est de l'« offuscation ».

Cette stratégie de gestion et de production de l'information vise à obscurcir le sens qui peut être tiré d'une action ou d'un message, dans le but de troubler ceux qui en prennent connaissance et de les empêcher de tirer un profit de ce qu'ils croient apprendre.

Une définition plus précise pourrait être : « L'offuscation est la création délibérée d'informations surabondantes, ambiguës, désordonnées ou fallacieuses en les mélangeant aux données véridiques afin de rendre plus difficiles leur collecte, leur analyse et leur utilisation. » Autrement dit, tout ce qui brouille, obscurcit, assombrit, opacifie, masque, noie, fausse, gêne, rend illisibles des données est de l'offuscation. Un récent livre lui est consacré, traduit en français (*voir la bibliographie*). On y découvre les multiples formes, anciennes ou contemporaines, de cette technique de protection contre les regards indiscrets.

Depuis qu'on sait qu'internet est le terrain de chasse rêvé des collecteurs de « big data » et que des dossiers volumineux sont constitués sur chacun de nous pour mieux nous cibler, nous ressentons le besoin de nous protéger de ces intrusions dans nos vies. L'idée de cliquer sur les publicités gênantes est à l'origine du logiciel AdNauseam (https://adnauseam.io) qui, sans que vous ayez à vous en préoccuper, clique lui-même sur toutes les publicités des pages que vous consultez et empêche ainsi la constitution de profils pertinents à votre sujet. Le logiciel TrackMeNot (http://trackmenot.io) produit des effets de brouillage du même type.

D'autres méthodes plus radicales existent. Les VPN (*virtual private networks*, réseaux virtuels privés) permettent de créer des liens directs entre des ordinateurs distants, qui isolent leurs échanges du reste du trafic. La connexion au réseau TOR est un autre moyen qui, entre autres choses, rend anonyme une session de navigation web.

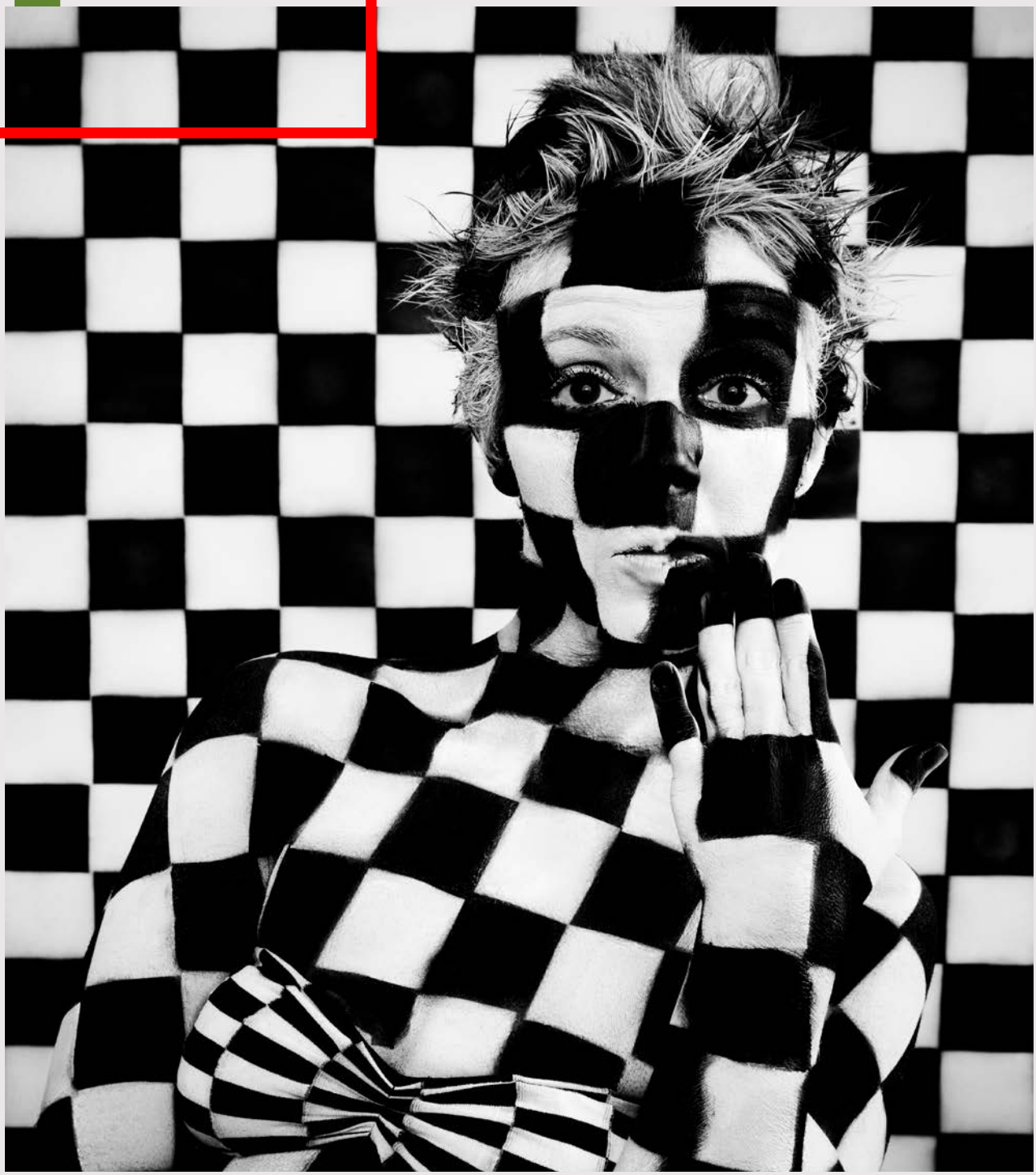
UNE PRATIQUE VIEILLE COMME LE MONDE… VIVANT

Le problème n'est en fait pas nouveau. Dans leur lutte pour la survie, les organismes vivants ont depuis longtemps mis en œuvre des méthodes d'offuscation. Un exemple spectaculaire et esthétique est celui des ocelles de papillons, ces motifs ronds imitant des yeux qui font fuir les prédateurs lorsque l'insecte déploie brusquement ses ailes. Les ocelles du paon-du-jour évoquent ainsi assez bien le regard d'un mammifère. De nombreux poissons, tels que le >

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

CAMOUFLAGES D'ART

Diverses formes d'art jouent ave le brouillage de l'information visuelle. Les trompe-l'œil et certaines formes de peintur corporelle, ou *body-painting*, créent ainsi des illusions des effets fantasques ou décoratifs, comme dans la photographie ci-dessous. L'artiste japonaise Hikaru Cho (www.hikarucho.com) est mondial ment connue pour ses maquillages déconcertants, faisant par exemple apparaître la tête reliée au corps par un ressort. L'Américaine Carolyn Roper (www.instagram.com/bodypaintgi l) réussit à cacher des personnages entiers là où on s'y attend le moins, par exemple devant un étalage de fruits et légumes. L'Américaine Bev Doolittle (www.bevdoolittle.net), elle, utilise l'idée du camouflage po r peindre des paysages habités par des êtres presque invisibles.



chétodon de Bennett, arborent aussi des ocelles.

Une autre méthode d'offuscation dans le monde vivant est le camouflage, qui perturbe la perception du prédateur éventuel ou la proie approchée en imitant le terrain sur lequel l'animal se déplace. L'imitation n'est pas nécessairement très précise, l'essentiel étant de perturber la perception de l'ennemi. On suppose ainsi que les motifs variés des pelages des félins aident à rendre plus discrète leur approche, que les taches qui ornent la robe des girafes aident à masquer leur présence dans une brousse ou une savane, etc.

Les phasmes sont des insectes maîtres absolus du camouflage. Il y a les phasmes-bâtons qui ressemblent à des branches, les phasmes-feuilles, les phasmes-ronces, les phasmes-écorces dont les noms indiquent l'objectif de leur mimétisme. Un autre exemple magnifique d'offuscation est celui de certaines araignées, comme *Cyclosa mulmeinensis*, qui parsèment les toiles qu'elles tissent de cadavres desséchés de proies auxquelles elles donnent l'aspect de leur propre corps, ce qui trompe les prédateurs.

L'OFFUSCATION, BIEN CONNUE DES MILITAIRES

Le camouflage est aussi une pratique bien connue des militaires, et chaque armée cherche à l'améliorer. Les tenues léopard se confondent avec le paysage et rendent les soldats difficiles à repérer. On fabrique en bois, en carton ou en caoutchouc de faux matériels – chars, canons, avions, bateaux, etc. – que l'on place sur le terrain pour faire croire à l'ennemi que l'on dispose d'armes nombreuses. En vue du débarquement de Normandie, en 1944, les armées alliées conçurent l'opération Fortitude dont l'objectif était de masquer la réalité de leurs forces, le lieu envisagé du débarquement et la localisation des troupes une fois le débarquement enclenché. De faux chars gonflables et de faux bateaux pour leurrer les forces allemandes furent notamment utilisés.

Les trompe-l'œil sont aussi de l'offuscation. Sur le mur de l'Atlantique, les Allemands dessinèrent de fausses fenêtres et toitures aux blockhaus afin de donner l'image de maisons d'habitation.

Avec les avions et bateaux furtifs, on cherche à diminuer le plus possible l'information produite et à faire croire qu'un espace ou une mer est vide, alors que s'y déplacent les chasseurs prêts à l'attaque, des bombardiers en mission ou des navires espions en observation. Depuis l'invention des radars, pendant la Seconde Guerre mondiale, et de divers autres systèmes électroniques, la conception de ces engins furtifs est devenue très délicate. Aujourd'hui, les techniques de furtivité visent à rendre les avions, navires ou armes diverses aussi peu détectables que possible en réduisant leurs signatures. Il faut éviter d'être vu (discrétion visuelle), éviter d'être entendu (discrétion

2 FURTIVITÉ SUR INTERNET

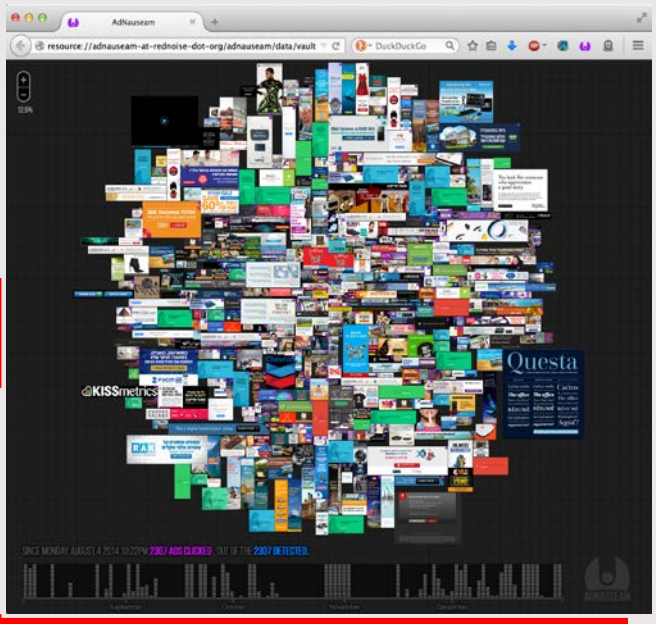
Lorsque nous surfons sur internet, nous sommes espionnés. Des informations sur les pages que nous consultons sont enregistrées et utilisées pour ajuster les publicités qui apparaîtront sur les futures pages consultées.

Pour gêner cet espionnage, le logiciel AdNauseum (voir https://adnauseam.io) s'occupe tout seul de cliquer systématiquement sur toutes les publicités qui apparaissent sur les pages consultées. Cela a bien sûr pour effet de donner une image inexacte de nos goûts et pôles d'intérêt. Comme pour le javanais, il s'agit d'offuscation par ajout d'informations erronées aux informations vraies impossibles à cacher.

Malheureusement, cela ne résout pas tous les problèmes créés par les technologies modernes. Nos téléphones portables, par exemple, suivent nos déplacements et rendent possibles l'enregistrement de chacun de nos trajets et de chacune des actions que nous faisons en les utilisant.

Le « Règlement général sur la protection des données » (RGPD) de l'Union européenne est le texte de référence en matière de protection des données à caractère personnel. Il renforce et unifie la protection des données pour les individus en Europe, mais, même appliqué, ce règlement ne nous protège pas entièrement des collecteurs de données massives. Ceux-ci nous forcent bien souvent à donner notre accord pour les laisser aspirer nos données, ou trouvent de nouveaux moyens pour poursuivre la violation devenue systématique de notre intimité.

Le roman *Les Furtifs* d'Alain Damasio (La Volte, 2019) imagine le monde en 2040, quand tout sera devenu encore pire et que des individus décidés et rebelles tenteront d'échapper à cet espionnage permanent de tous.



Un graphique affiché par le logiciel AdNauseam, donnant des statistiques sur les sites publicitaires qu'il a détectés et gérés, sur une période donnée.

acoustique), éviter d'être repéré par les radars (discrétion radar), éviter d'engendrer trop de chaleur (discrétion thermique), éviter d'être identifié par les télémètres (discrétion laser), et éviter d'être repéré en émettant soi-même des ondes radar!

Pour obtenir cette furtivité, on joue à la fois sur les formes géométriques, sur les matériaux, sur les trajets empruntés, par exemple en favorisant le vol à très basse altitude. On utilise aussi des leurres, du brouillage ou, mieux, de la manipulation électronique des ondes en renvoyant au radar ennemi un signal de même fréquence que celui qu'il émet. On étudie aussi des techniques pour entourer les avions d'un champ de plasma qui absorbe les ondes radar.

Dans les conflits modernes, induire en erreur l'ennemi par la désinformation prend des formes cruelles dont la loyauté est parfois discutée. Pendant la guerre d'Algérie, la Bleuite fut une opération d'infiltration et d'intoxication à grande échelle, montée par les services secrets français du SDECE (Service de documentation extérieur et de contre-espionnage). Elle resta longtemps méconnue du public, malgré ses effets dévastateurs. Les agents français dressaient des listes de prétendus collaborateurs algériens de l'armée française et les faisaient parvenir aux chefs de l'Armée de libération nationale algérienne. Ces fausses informations ont provoqué de terribles purges internes qui ont fait des centaines de morts parmi les cadres combattants algériens.

FAUSSES LANGUES

Un bel exemple, lui aussi ancien, d'offuscation est celui des fausses langues telles que le verlan, le javanais ou le louchébem, des argots plus ou moins codifiés issus du français. Tout le monde connaît le verlan dont le principe consiste à changer l'ordre des syllabes ou des lettres d'un mot pour le rendre incompréhensible. La transformation est parfois assez compliquée. Exemples de mots en verlan: la reum, une meuf, un keum, la teuf, un rebeu, la zicmu, une caillera, pécho, vénère, reuf, reup, laisse béton (pour la traduction et d'autres exemples, voir www.francaisavecpierre.com/le-verlan/).

Le javanais procède d'une déformation des mots plus mécanique, où l'offuscation consiste à ajouter des lettres selon les règles suivantes (voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Javanais_(argot)):

– Ajouter *av* après chaque consonne (sauf si elle est finale) ou groupe de consonnes tel que *ch*, *cl*, *ph*, *tr*, etc. (train → travain, bon → bavon, champion → chavampavion, bonjour → bavonjavour). Ne pas ajouter *av* dans le cas du *e* muet (tarte → tavarte).

– Ajouter *av* aux mots monosyllabes (a → ava, en → aven, un → avun, etc.) et aux mots commençant par une voyelle (abricot → avabravicavot, allumettes → avallavumavettes, immeuble → avimmaveuble).

– Considérer le *y* comme une consonne s'il est suivi d'une voyelle (moyen → mavoyaven).

Le louchébem, qui fut utilisé par les bouchers, se définit en une seule phrase: substituer *l* à la consonne initiale de la première syllabe du mot ou, si le mot commence par un *l* ou une voyelle, de la syllabe suivante et rétablir, en fin de mot, la consonne initiale avec un suffixe libre. On a ainsi: bonjour → lonjourbem, boucher → louchébem, client → lienclès, dame → lamem, café → laféquès, combien → lombienques, comprend → lomprenquès, en douce → en loucedé.

Le jeu des contrepèteries est aussi une forme d'offuscation pratiquée pour échanger des messages à caractère grivois. Comme pour le verlan, on permute des syllabes ou des lettres, mais cette fois le jeu s'applique non plus à des mots isolés mais à des phrases, ce qui rend parfois très délicat le déchiffrement. Voici quelques exemples: des boules antimites; cet ordi me remplit de joie; l'hirondelle ne craint pas la traque; attention aux coups de feu; les soupers russes manquent de pain; quand les athées se battent, les abbés se taisent (voir https://lapoulequimue.fr pour les solutions).

Parmi les méthodes d'offuscation utilisées par les malfrats, les militaires, les espions ou les écrivains, mentionnons encore le simple changement d'identité, les déguisements, la radio que l'on fait hurler pendant que l'on parle, et l'anagramme ou l'acrostiche qui permettent de signer discrètement un texte comme l'ont fait Boris Vian avec Bison Ravi et François Villon avec ce poème:

Vous portâtes, digne Vierge, princesse,
Jésus régnant qui n'a ni fin ni cesse.
Le Tout-Puissant, prenant notre faiblesse,
Laissa les cieux et nous vint secourir,
Offrit à mort sa très chère jeunesse;
Notre Seigneur tel est, tel le confesse:
En cette foi je veux vivre et mourir.

AVEC L'INFORMATIQUE, L'OFFUSCATION RENOUVELÉE

Avec l'informatique, de nouvelles formes d'offuscation sont apparues, et elles y jouent des rôles parfois centraux. J'ai déjà mentionné les méthodes consistant à brouiller les pistes pour fausser les données récoltées par ceux qui nous espionnent en cliquant sur des liens qui ne nous intéressent pas, ou en utilisant des techniques de camouflage réseau.

Je ne détaillerai pas la pratique massive des infox (*fake news*) dans les réseaux sociaux modernes qui ne sont que de la diffusion d'informations fausses. En revanche, je mentionnerai deux types d'offuscations nouvelles liées aux technologies de l'information: l'offuscation de programmes informatiques et de circuits

OFFUSCATION OU OBFUSCATION

« Offuscation » est un mot dérivé du latin *offuscare*, qui signifie « obscurcir ». Il était notamment utilisé en astronomie (par exemple : « offuscation du soleil par les nuages »). En anglais, le terme est *obfuscation*, et cette orthographe avec un *b* est parfois utilisée en français. Le problème de la bonne orthographe a donné lieu à un âpre débat sur wikipédia (voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Discussion:Offuscation) qui a finalement adopté, comme on le fait ici, les deux *f*. Le terme « brouillage » est parfois recommandé, mais nous lui préférons « offuscation », simple à prononcer et présent dans les dictionnaires de langue française.

électroniques, et l'offuscation de liens internet.

Pour qu'un ordinateur exécute un programme, il doit en disposer d'une copie, et donc le programme ne peut pas être secret. C'est ennuyeux si les auteurs de ce programme souhaitent protéger les idées, algorithmes, codages des données, etc., qu'ils ont utilisés et peut-être inventés à cette fin. Il en va de même pour les circuits électroniques qui, d'une certaine façon, sont des programmes transformés en objets : en vendant un circuit, il semble que vous rendez accessible à l'acheteur les idées qui ont permis de le concevoir, qu'il peut alors voler et réutiliser à votre insu. L'offuscation des programmes et des circuits est devenue une question grave.

En informatique, on distingue le programme source écrit en langage de haut niveau, assez facile à lire par un humain, et le programme compilé, résultat de la transformation du programme source en instructions directement exécutables par l'ordinateur (ou en circuit électronique si l'on considère la version matérielle d'un programme). Cette transformation rend en général assez incompréhensible la logique utilisée pour concevoir le programme, donc ses idées. Cependant, des techniques dites de désassemblage ou de décompilation permettent de retrouver un certain nombre d'informations du programme source, voire de rendre parfaitement clairs les traitements qu'opère le programme compilé (ou le circuit).

RENDRE ININTELLIGIBLE SANS EMPÊCHER DE FONCTIONNER

Pour éviter cette rétro-ingénierie, des techniques d'offuscation empêchent la compréhension et donc la réutilisation des idées des programmes et circuits, cela sans compromettre leur fonctionnement.

3 OFFUSCATION MILITAIRE

Les militaires utilisent diverses méthodes d'offuscation, par exemple pour se fondre [illegible] à l'inverse, pour exhiber des armes en grand nombre… mais factices. En voici deux exemples.

L'opération Fortitude

La désinformation a joué un rôle important dans l'organisation et la mise en œuvre du débarquement allié en Normandie, en 1944. L'opération Fortitude, destinée à masquer le lieu exact du débarquement, a été un succès, et son rôle a sans doute été décisif dans l'issue de la guerre contre les nazis. Les Alliés ont utilisé dans le cadre de cette opération divers stratagèmes :

- de faux chars gonflables et de faux bateaux ;
- des unités fantômes menant une intense activité radio ;
- des fuites délibérées de fausses informations vers les diplomates des États neutres, qui ensuite parvenaient aux Allemands ;
- des agents doubles intoxiquant les services secrets allemands ;
- des reconnaissances aériennes et maritimes intenses sur toute la longueur de la côte pour que l'ennemi ne dispose d'aucun indice sur le lieu réel du débarquement ;
- des bombardements sur le nord de la France laissant croire que la priorité était le Pas-de-Calais.

Les généraux allemands furent persuadés que le débarquement en Normandie était une diversion. Ils choisirent de maintenir en alerte les 150 000 hommes de leur XVe armée dans le Pas-de-Calais et ne prirent que tardivement la décision d'envoyer ces troupes combattre en Normandie.

Après le débarquement, ces opérations massives d'offuscation se sont poursuivies avec une armée fantôme, la « Ghost Army » composée de 1 000 hommes qui en simulaient 30 000. Elle suivait l'armée réelle et utilisait toutes les techniques possibles de désinformation pour perturber les décisions allemandes et disperser leurs efforts.

Les bateaux et avions furtifs

Les avions militaires sont aujourd'hui conçus pour avoir des signatures radar et infrarouge aussi faibles que possible. La furtivité radar d'un avion est caractérisée par sa « surface équivalente radar », ou SER, qui est la superficie plane qui renverrait la même énergie que l'avion. On sait obtenir des valeurs de SER de l'ordre du mètre carré pour les avions. Le Lockheed Martin F-22 Raptor de l'armée de l'air des États-Unis *(photo ci-dessus)* aurait même une SER équivalente à celle d'un oiseau.

Voici des procédés élémentaires pour brouiller la lecture d'un programme, même quand il est écrit en langage de haut niveau :

– Supprimer les commentaires du programme. C'est la première et la plus simple des opérations d'offuscation envisageables.

– Changer le nom des variables pour qu'elles n'évoquent rien, par exemple en les nommant v1, v2, v3, v4, ..., et utiliser plusieurs fois les mêmes noms de variable quand il est possible de le faire sans perturber le fonctionnement.

– Compresser le programme au maximum. Certains langages comme le Fortran ont la propriété qu'en supprimant tous les blancs d'un programme, rien ne change dans son fonctionnement ; mais ce n'est pas le seul type de compression envisageable. Des raccourcis de syntaxe sont souvent prévus et les utiliser systématiquement obscurcira un programme.

– Compliquer sans véritable raison. À l'inverse de la compression, l'introduction d'instructions inutiles qui ne seront jamais exécutées produira aussi des difficultés de compréhension. Par exemple on peut ajouter des « si-alors_sinon » allant toujours vers la même alternative et qui ne serviront donc à rien.

– Brouiller la logique du programme avec des « go to » qui introduisent de la confusion en plaçant par exemple au début ce qui ne s'exécute qu'à la fin, ou inversement.

– Utiliser des particularités peu connues du langage.

Signalons à ce propos l'existence d'un concours annuel d'offuscation, l'IOCCC (International Obfuscated C Code Contest, www.ioccc.org).

Il existe aussi des programmes « offuscateurs » qui automatisent le brouillage. Partant d'un programme P, un programme offuscateur Offus le transforme en un programme P' = Offus(P) aussi peu lisible que possible, sans en changer le fonctionnement : P et P' font toujours exactement la même chose pour tout jeu de données.

Malheureusement, une série de résultats, dus en particulier à Boas Barak, des Laboratoires de Microsoft à Cambridge, montrent qu'il ne peut exister de méthodes générales et efficaces d'offuscation. Cela n'interdit pas que d'assez bons systèmes soient aujourd'hui disponibles.

OFFUSCATION DE LIENS INTERNET

Les pages internet comportent des liens (les URL, pour *uniform resource locater*) qui, lorsque le lecteur clique dessus, conduisent chacune à une autre page, pointée par le lien associé. Les robots d'indexation des moteurs de recherche parcourent aussi systématiquement que possible tout le web en exploitant ces liens et en les suivant pour visiter les pages correspondantes et compléter leurs données. Par ailleurs, les moteurs de recherche mesurent la notoriété d'une page pour déterminer sa position dans une liste de liens donnée en réponse à une requête ; pour ce faire, ils prennent en compte le nombre de liens pointant vers cette page identifiés dans les pages parcourues par leurs robots. Ce que voient ces robots doit donc être contrôlé.

Parfois les développeurs web ne veulent pas que certains liens soient suivis par les robots ou soient clairement lisibles, car ils ne souhaitent pas favoriser les notations des pages indiquées en lien, ou parce qu'ils ne veulent pas dévoiler l'URL vers laquelle ils vous envoient, ou encore parce que la mauvaise réputation de la page indiquée pourrait entraîner une pénalité de réputation pour la page qu'ils écrivent, voire son placement sur une liste de pages frauduleuses à ne jamais recommander.

Les développeurs web recherchent donc parfois, pour les pages qu'ils conçoivent, à empêcher le suivi de certains liens par les robots des moteurs de recherche, tout en faisant ce qu'il faut pour qu'un lecteur de la page puisse cliquer sur le lien et provoquer normalement le saut vers la page en question. Ce problème est celui de l'offuscation de liens : on veut indiquer un lien sans que les robots des moteurs de recherche le sachent. Il a été résolu par diverses méthodes.

Ajouter une indication « no follow » prévue pour cela dans le codage des pages web est une méthode qui devrait dissuader les robots de prendre en compte le lien concerné. Cependant, on soupçonne que les robots d'indexation ne respectent pas ce type de commande. Il faut donc trouver autre chose. Certaines techniques reviennent, en gros, à faire en sorte que le lien ne sera pas inscrit dans le texte de la page web elle-même, mais sera calculé ou lu ailleurs, puis seulement mis en action. De cette façon, un utilisateur de la page ne percevra pas de différence avec un lien usuel, alors qu'un robot ne verra pas l'URL (voir https://pxagency.fr/nofollow-obfuscation/ pour des détails techniques).

À côté du chiffrement de données, des signatures numériques et des problèmes d'authentification, l'offuscation consiste à perturber les analyses de ceux qui exploitent les données que vous ne pouvez pas faire disparaître, tels qu'un programme, un lien internet ou vos comportements sur les réseaux. Les problèmes informatiques qu'elle pose ouvrent un nouveau chapitre de la science cryptographique : les développements des ordinateurs et des réseaux obligent à repenser cet art de la dissimulation devenu essentiel à la protection de notre vie privée, ou du secret des algorithmes que l'on souhaite vendre mais pas divulguer. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Nissenbaum et F. Brunton, **Obfuscation - La vie privée, mode d'emploi**, C&F Éditions, 2019.

G. Di Crescenzo, **Cryptographic program obfuscation : Practical solutions and application-driven models**, dans M. Conti *et al.* (éds.), *Versatile Cybersecurity*, Springer, 2018, pp. 141-167.

H. Xu *et al.*, **On secure and usable program Obfuscation : A survey**, prépublication arXiv:1710.01139, 2017.

D. Forte *et al.*, **Hardware Protection Through Obfuscation**, Springer, 2017.

B. Barak *et al.*, **On the (im) possibility of obfuscating programs**, *Journal of the ACM*, vol. 59(2), article 6, 2012.

P. Baud, **Axolot #8 : Fake !**, vidéo sur les fausses informations : https://youtu.be/IyMzllKrJEC

L'AUTEUR

LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
Pour la Science

UN PEU PLUS PRÈS DES ÉTOILES

Invitée de la «Résidence 1+2», qui associe photographes et scientifiques, Manon Lanjouère explore le rêve d'Icare et les études balistiques qu'il impose… pour les prolonger.

Le 16 juillet 1969, 13 h 32, Cap Canaveral, en Floride. C'était il y a tout juste cinquante ans. Près d'un million de spectateurs sont là, les yeux rivés vers le ciel, les mains en visière pour éviter l'éblouissement. Ils ont tous fait le déplacement pour assister au décollage, historique, de la fusée *Saturn V* emmenant à son bord les hommes qui, les premiers, poseront le pied sur la Lune cinq jours plus tard.

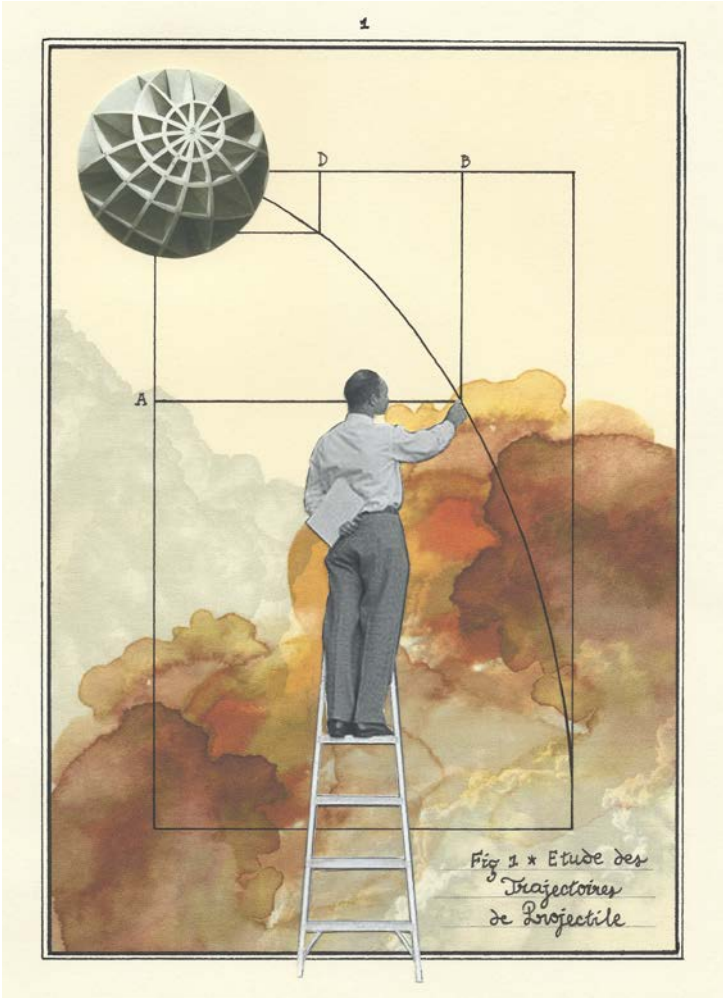
Manon Lanjouère n'était pas née, mais elle a tout autant que le public du centre spatial Kennedy les yeux tournés vers le ciel, la Lune et, plus encore, vers l'espace. Diplômée en 2017 de l'école des Gobelins, elle est l'une des trois photographes de la quatrième «Résidence 1+2». Cette manifestation organisée à Toulouse associe le monde de la photographie d'auteur à l'univers scientifique particulièrement dense dans la région Occitanie. Pendant deux mois, les photographes, d'horizons différents, côtoient le monde de la recherche.

Les échanges ont été très fertiles: «Nous, les scientifiques, nous sommes très accrochés à la réalité», avoue Sylvestre Maurice, astrophysicien à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie, à Toulouse, et parrain de l'édition 2019. «Nous sommes des explorateurs à vrai dire assez peu rêveurs. Avec eux [les photographes], j'ai retrouvé cette part de rêve.»

Manon Lanjouère a pris ses quartiers auprès de Serge Gracieux, muséographe à la Cité de l'espace, et de Laurent Joly, chef du département d'aérodynamique, énergétique et propulsion et professeur à l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (Isae-Supaero).

La photographe s'est intéressée aux méthodes pour atteindre les altitudes extrêmes, au désir de voler, aussi ancien que l'humanité. Cette quête s'est longtemps heurtée à la physique dont les lois comme celle de la gravitation s'opposent à l'envol. Comment résoudre ce problème? Comment s'affranchir de tels

Les yeux tournés vers le ciel pour rejoindre le ciel, la Lune et l'espace tout entier. Un rêve devenu réalité grâce à la balistique.



obstacles ? La résidence fut pour Manon Lanjouère l'occasion de faire un grand voyage dans l'histoire de la mécanique de la propulsion et vers le vide spatial.

Elle s'est notamment appropriée la balistique (la mère de l'astronautique), cette science des trajectoires de tout projectile, de la balle lancée dans une cour de récréation aux plus grosses fusées. Ses clichés (*voir deux d'entre eux ci-dessus*) se nourrissent des travaux de Tartaglia et de Galilée aux XVIe et XVIIe siècles sur les courbes dessinées par les boulets de canon jusqu'aux succès de la mission *Apollo 11* et de Neil Armstrong.

Elle pousse encore plus loin le rêve d'Icare en s'interrogeant sur des futurs voyages emportant des humains en impesanteur plus loin encore que la Lune, seulement « premier jalon sur la route de l'infini » selon elle, « vers un territoire noir, un continent qui n'a plus l'horizon pour limite. »

Les deux autres photographes invités de la « Résidence 1+2 » sont Matthieu Gafsou et Matilda Holloway. Le premier s'est penché sur les sciences de l'environnement et les sciences humaines, la seconde sur les sciences de la représentation et les sciences naturelles. L'ensemble des photographies sont exposées à la Chapelle des Cordeliers, à Toulouse. Elles sont également au cœur d'un coffret de trois ouvrages, publié chez Filigranes. Enfin, le vidéaste Citizen JiF a eu « carte blanche » pour réaliser un film mettant en perspective les trajectoires des résidents. Encore une histoire de trajectoire... ■

Le site de la Résidence : www.1plus2.fr

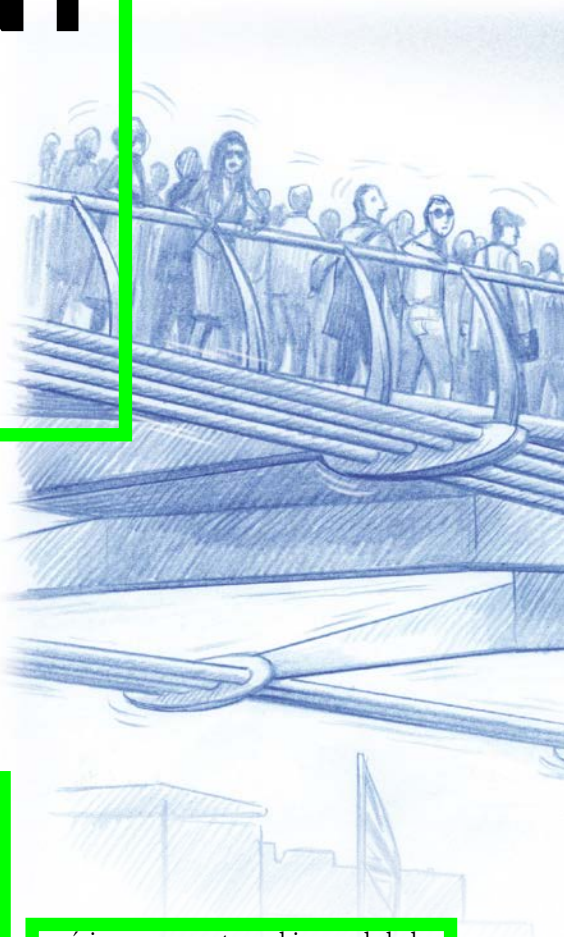
L'auteur a publié : **Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...** (Belin, 2018)

LES AUTEURS

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

QUAND LE PONT BALANCE, LES PIÉTONS DANSENT

On croyait tout savoir sur la conception des ponts. En fait, on avait oublié l'effet de leurs vibrations sur la marche des piétons qui les franchissent.



Le 10 juin 2000, le Millennium Bridge (la «passerelle du millénaire»), à Londres, était inauguré. Alors qu'une foule compacte le traversait, le pont s'est mis à osciller d'un côté à l'autre. L'amplitude du mouvement a [illegible] que les personnes étaient obligées de se tenir aux balustrades pour ne pas tomber. Les autorités fermeront la passerelle au public deux jours plus tard. Et il faudra 18 mois et 5 millions de livres de travaux sur la structure pour empêcher que la situation se reproduise.

Pourquoi les ingénieurs n'avaient-ils pas prévu une oscillation aussi forte? En fait, un mécanisme original avait échappé à toutes les modélisations antérieures: lorsque les piétons sont assez nombreux, leur marche se synchronise spontanément avec les oscillations de la passerelle.

Pour comprendre les oscillations du Millennium Bridge, deux catastrophes datant du XIXe siècle sont riches d'enseignements. La première s'est produite en 1831 avec le pont de Broughton, au Royaume-Uni: il s'effondré lorsqu'une troupe de 60 militaires marchant au pas le franchissait. Pourquoi? À cause d'un effet de résonance bien connu, dû à la coïncidence entre la fréquence du pas des soldats avec l'une des fréquences naturelles de vibration du pont.

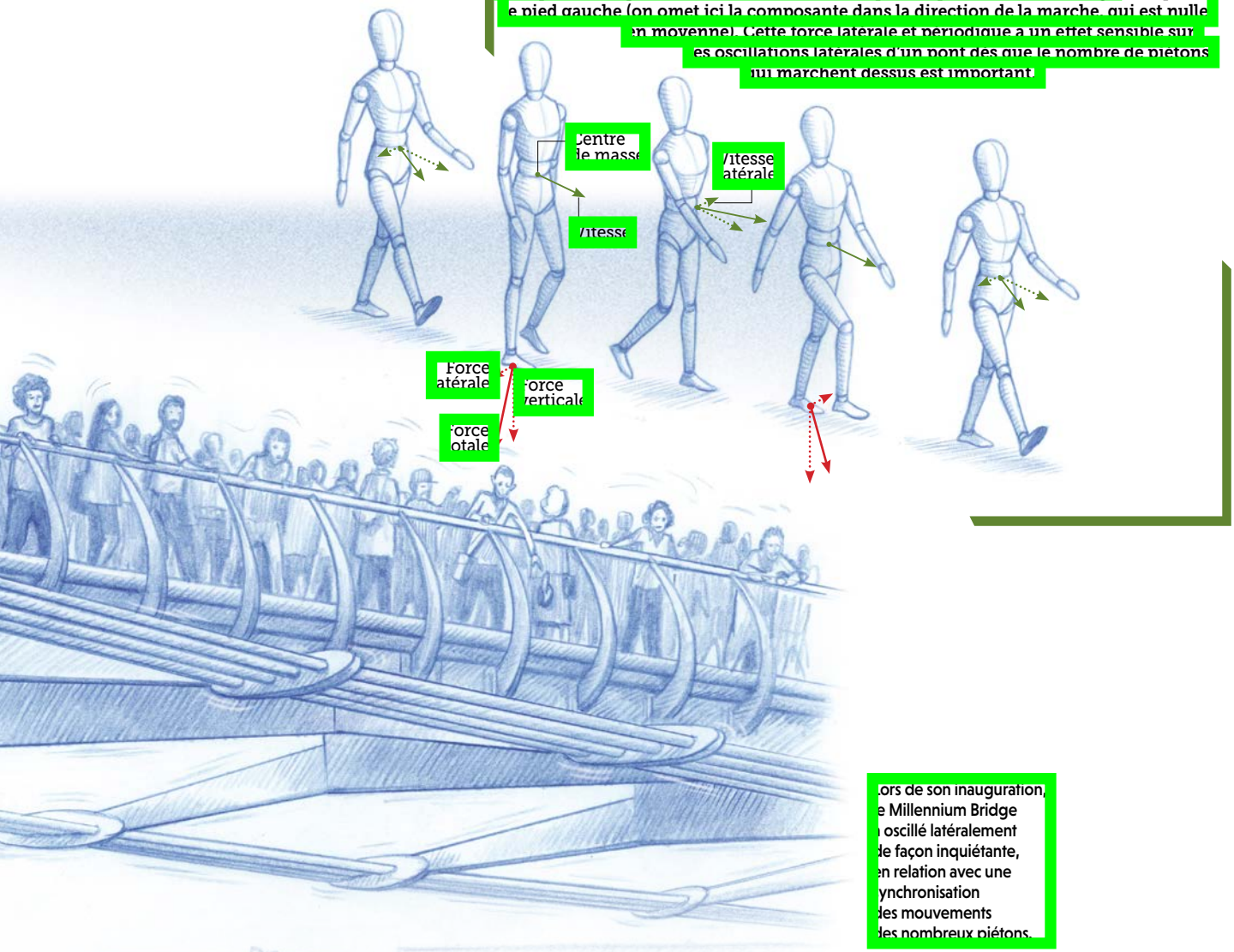
RÉSONANCE SUR PONT OU SUR BALANÇOIRE

Le phénomène est le même que celui à l'œuvre lorsqu'on pousse un enfant sur une balançoire à chaque fois qu'il revient vers nous. Il n'est pas nécessaire que l'énergie fournie à chaque poussée soit importante pour que l'amplitude de l'oscillation augmente. Il suffit qu'elle soit supérieure aux pertes subies par la balançoire lors d'une oscillation.

Dans le cas du pont de Broughton, l'effet d'un seul piéton marchant normalement était insuffisant pour le faire vibrer, car la dissipation l'emportait. Tel n'était plus le cas lorsque l'énergie était apportée par 60 gaillards marchant au pas; d'autant plus que, amusés par les oscillations naissantes, ils se sont mis à marcher au rythme exact des mouvements du pont. Ainsi, à chaque pas, l'effet de l'impulsion verticale des pieds s'ajoutait à celui des pas précédents. L'amplitude des vibrations – ici verticales – s'est alors amplifiée jusqu'à ce que le pont cède.

UNE FORCE QUI SE DANDINE

Lorsqu'une personne marche, son centre de masse fait des va-et-vient verticalement, mais aussi latéralement. Ce mouvement latéral a pour conséquence que le pied qui touche le sol exerce sur celui-ci une force avant une petite composante latérale, vers la droite pour le pied droit et vers la gauche pour le pied gauche (on omet ici la composante dans la direction de la marche, qui est nulle en moyenne). Cette force latérale et périodique a un effet sensible sur les oscillations latérales d'un pont dès que le nombre de piétons qui marchent dessus est important.



Lors de son inauguration, le Millennium Bridge a oscillé latéralement de façon inquiétante, en relation avec une synchronisation des mouvements des nombreux piétons.

Soyons un peu plus quantitatifs. Lorsque nous marchons, nous faisons, en gros, deux pas par seconde. Cela signifie que deux fois par seconde, c'est-à-dire à une fréquence de 2 hertz, nous appuyons sur le sol vers le bas avec une force dont l'amplitude moyenne est égale à notre poids. Et avec 60 piétons marchant au pas, l'ensemble de ces individus engendre une force périodique dont l'amplitude est 60 fois celle d'une personne.

Cependant, si les marcheurs ne se coordonnent pas, l'amplitude totale est bien plus faible, car certains vont par exemple marcher à contretemps. Les lois des phénomènes aléatoires montrent que la force augmente alors comme la racine carrée du nombre de marcheurs. Autrement dit, la force exercée par une foule de 60 piétons sur un pont est près de 8 fois supérieure à celle exercée par un piéton, mais 8 fois plus faible que celle de 60 individus marchant au pas.

On comprend donc pourquoi, depuis la catastrophe de Broughton, les militaires ont pour consigne de rompre le pas sur les ponts. On comprend également pourquoi les ingénieurs conçoivent des ponts dont les fréquences naturelles de vibration diffèrent de 2 hertz. Ils font aussi en sorte que les vibrations du pont soient amorties au voisinage de cette fréquence, afin que les mouvements verticaux du pont engendrés par les marcheurs restent limités et ne nuisent pas au confort de la marche.

Ces contraintes sont bien connues depuis longtemps et parfaitement intégrées par les cabinets d'architecture. Alors que s'est-il passé sur le Millennium Bridge? Une autre catastrophe va nous orienter vers la réponse. Le 16 avril 1850, en France, 220 soldats du 11e régiment d'infanterie légère et 3 civils ont trouvé la mort lors de l'effondrement du pont de la Basse-Chaîne à Angers, l'un des premiers

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

ponts suspendus. L'ordre avait pourtant été donné aux soldats de rompre le pas. Toutefois, sous l'effet de rafales de vent, le pont a commencé à s'agiter latéralement. Pour s'équilibrer, les soldats se sont portés d'un côté puis de l'autre ; ces mouvements coordonnés ont alors amplifié les embardées horizontales du pont jusqu'à provoquer son effondrement. Ainsi, alors qu'en arrivant sur le pont, les soldats avaient cessé de coordonner leurs pas, les oscillations de la structure ont resynchronisé ces derniers !

UNE SYNCHRONISATION INATTENDUE

C'est un phénomène de même nature qui s'est produit à Londres avec le Millennium Bridge, mais selon un mécanisme non anticipé. Lorsque nous marchons, nos deux pieds avancent chacun sur deux lignes parallèles distantes l'une de l'autre de la largeur de nos hanches. Par conséquent, en plus d'oscillations verticales, notre centre de masse oscille horizontalement.

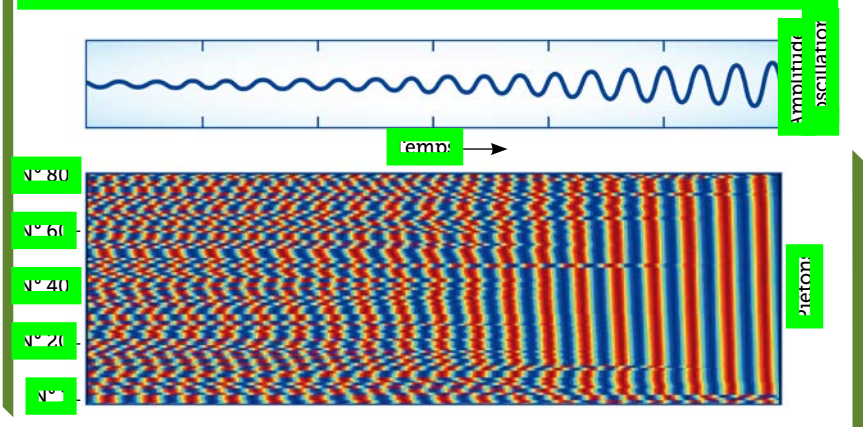
La force exercée par nos pieds sur le sol a donc une petite composante horizontale dirigée vers l'extérieur du pied : vers la gauche pour le pied gauche, vers la droite pour le pied droit (*voir l'encadré page précédente*). Comme nous posons chaque pied une fois par seconde, la fréquence de cette force latérale est de 1 hertz. Son amplitude est de l'ordre de 1 % du poids, et l'on s'attend donc à un effet très faible.

C'est vrai pour l'effet sur l'amplitude du mouvement du pont qui, dans notre cas, n'a jamais dépassé quelques centimètres, mais pas pour l'effet sur la marche des piétons. Pourquoi ? Parce que lorsque le sol bouge sous nos pieds, nous sommes bien plus déstabilisés par des mouvements latéraux que par des mouvements verticaux ; nous essayons alors de retrouver notre équilibre par des réajustements de la position des pieds et divers autres mouvements.

Détaillons. Puisque les piétons ne marchent pas tous exactement au même rythme, l'amplitude de la force latérale est de l'ordre de la force d'un seul marcheur multipliée par la racine carrée du nombre de piétons. Cela fait légèrement osciller latéralement le pont. Tant que l'amplitude de cette oscillation reste faible, les piétons ne sont pas perturbés. Mais quand le nombre de marcheurs est élevé, elle devient assez importante pour affecter la marche de quelques-uns, ceux dont les pas étaient pratiquement au rythme des oscillations latérales.

DES MARCHES QUI SE SYNCHRONISENT

Diverses modélisations et simulations numériques ont reproduit le phénomène de synchronisation de la marche de piétons qui franchissent un pont, sous l'effet des oscillations latérales de celui-ci. Les graphiques ci-dessous montrent les résultats d'une telle modélisation, publiée en 2017 par Thomas Eckhardt et ses collègues *(voir la bibliographie)*. Le graphique du haut montre l'amplitude des oscillations du pont en fonction du temps ; celui du bas représente, toujours en fonction du temps, la phase de la marche *(codée en couleur)* de chaque piéton d'une foule constituée de 80 personnes. On constate que l'amplitude des oscillations augmente à mesure que les marches des piétons se synchronisent.



Ces piétons vont alors spontanément synchroniser leurs pas avec les mouvements du pont, ce qui accroît l'amplitude des oscillations. Celles-ci deviennent alors suffisantes pour affecter des piétons qui étaient un peu moins en rythme et les synchroniser. Ainsi, par un effet boule de neige, l'amplitude des oscillations et le nombre de piétons qui marchent en synchronie se renforcent mutuellement. Les accélérations latérales atteignent alors des valeurs suffisantes (de l'ordre de 0,3 mètre par seconde carrée, soit 3 % de l'accélération de la pesanteur) pour déséquilibrer les marcheurs.

Des simulations numériques et des expériences en grandeur réelle sont venues confirmer quantitativement cette explication (*voir l'encadré ci-dessus*). L'effet avait été mentionné depuis longtemps, à la fois par des ingénieurs et par des scientifiques, mais il était considéré comme anecdotique. Il a fallu la mésaventure du Millennium Bridge et les études qui ont suivi pour qu'on l'identifie clairement et qu'on le prenne en compte correctement dans les modélisations et la construction de nouveaux ponts. Cet incident a aussi permis de se rendre compte que ce phénomène d'oscillation latérale n'était pas isolé et concernait de nombreux ponts dans le monde, quel que soit leur type de structure. ■

ET LE PONT DE TACOMA ?

La rupture en 1940 du fameux pont de Tacoma, aux États-Unis, ne relève pas des mécanismes de résonance ou de synchronisation décrits ici. Cette catastrophe était due à l'interaction des oscillations de torsion du pont avec les tourbillons d'air créés au niveau du pont par des vents forts (voir « Pont de Tacoma : la contre-enquête », *Pour la Science*, février 2008).

BIBLIOGRAPHIE

T. Eckhardt *et al.*, **Modeling walker synchronization on the Millennium Bridge**, *Physical Review E*, vol. 75, article 021110, 2017.

P. Dallard *et al.*, **The London Millennium Footbridge**, *The Structural Engineer*, vol. 79(22), pp. 17-33, 2001.

Vidéo de l'oscillation du Millennium Bridge en 2000 : www.youtube.com/watch?v=eAXVa_XWZ8

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 504 (oct. 19
réf. PLS04

N° 503 (sept. 19
réf. PLS03

N° 502 (août 19
réf. PLS02

N° 501 (juillet 19
réf. PLS01

N° 500 (juin 19
réf. PLS00

N° 499 (mai. 19
réf. PLS99

N° 498 (avr. 19
réf. PLS98

N° 497 (mar. 19
réf. PLS97

N° 496 (févr. 19
réf. PLS96

N° 495 (jan. 19
réf. PLS95

N° 494 (déc. 18
réf. PLS94

N° 493 (nov. 18
réf. PLS93

A retourner accompagné de votre règlement à :

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

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

TOTAL A REGLER ☐ €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ☐ Ville : .....

Téléphone ☐

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

☐ **Carte bancaire**

N° ☐ ☐ ☐ ☐

Date d'expiration ☐ ☐

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) ☐

Signature obligatoire :

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

Offre valable jusqu'au 31/07/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

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

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMEROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

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

LE DÉCLIC ÉVOLUTIF DES CICHLIDÉS DU LAC VICTORIA

Le lac Victoria a été le siège d'une extraordinaire diversification de poissons cichlidés riches en couleurs. Plus de 500 espèces y sont apparues en moins de 15000 ans. Si l'analyse génomique a permis de cerner les clés de cette évolution, on vient d'en comprendre la dynamique.

Les grands lacs africains abritent une diversité stupéfiante de poissons cichlidés, une famille proche des labres très connue des aquariophiles par ses riches colorations: 250 espèces dans le lac Tanganyika, 800 dans le lac Malawi, les lacs Édouard, Albert et Kivu. Dans le lac Victoria, notamment, plus de 500 espèces sont apparues en moins de 15000 ans. Les biologistes appellent cela des bouquets d'espèces. Quelles caractéristiques ont rendu possible cette diversification? Et quel en a été le déroulement? Depuis longtemps, nombre de chercheurs tentent de répondre à ces questions. Mais ce n'est que tout récemment qu'une équipe a résolu l'énigme – pour le lac Victoria.

Les milliers d'espèces de cichlidés africains diffèrent principalement par quelques traits. D'un point de vue écologique, elles ont des places différentes dans la colonne d'eau et des modes variés de nutrition: détritivores, herbivores, carnivores... Corrélativement, leurs mâchoires sont elles aussi très variées: taille, nombre et forme des dents... Enfin, les mâles sont très colorés, avec des variations incroyables des gammes de couleur, ce qui a dû jouer un rôle clé dans la spéciation. Ces tenues de parade demandent par ailleurs une vue élaborée. Évidemment, toutes ces caractéristiques dépendent de l'environnement: la profondeur maximale du lac Tanganyika est de 1433 mètres, tandis que le lac Victoria atteint péniblement 82 mètres! Les colonnes d'eau des deux lacs ne sont donc pas comparables. Bref, si les études morphologiques ont révélé quels traits s'étaient diversifiés, elles n'ont fourni aucun indice sur ce qui avait pu permettre cette diversification.

Mais en 2014 un consortium international a publié une étude génomique comparative de cinq espèces de cichlidés africains: le tilapia du Nil, une lignée qui

Thoracochromis pharyngalis
Longueur maximale : 10,5 cm

Hervé Le Guyader a récemment publié : **L'Aventure de la biodiversité**, (Belin, 2018).

EN CHIFFRES

242

La lignée de poissons cichlidés qui a conduit au bouquet d'espèces du lac Victoria compte pas moins de 242 gènes présents en plusieurs exemplaires.

156

Pour déterminer pourquoi les cichlidés du lac Victoria se sont autant diversifiés, l'équipe d'Ole Seehausen, de l'université de Berne, a comparé les génomes de 156 poissons de la région.

18 %

Avec ses 68 100 km² de superficie et sa profondeur maximale de 82 mètres, le lac Victoria est l'un des plus grands lacs africains. Il est cependant 7 fois moins volumineux que son voisin le lac Tanganyika qui, avec une superficie de 32 900 km² et une profondeur maximale de 1 433 mètres, représente à lui seul 18 % des eaux douces du monde.

Le poisson provient du bassin du Nil. Prélevé en 2017 dans le canal de Kazinga, une large voie d'eau en Ouganda qui relie les lacs Édouard et George, il vit actuellement dans l'aquarium de l'ichtyologiste Ole Seehausen, en Suisse.

Cette nouvelle espèce du genre *Astatotilapia* vit au Congo.

Astatotilapia vaekama n. sp.

patron de coloration, tandis que les deux autres (*kfh-g* et *rho*) codent des opsines – des protéines essentielles pour la vision.

Mais ce qui a frappé le plus les généticiens est le nombre de duplications de gènes – plus de 200 –, six fois supérieur au taux moyen attendu. De plus, la proportion de transposons (éléments mobiles du génome) était élevée: 16 à 19% de l'ensemble des quatre génomes de cichlidés des grands lacs. Les chercheurs ont ainsi relevé trois vagues de nouvelles insertions de transposons dans chacun de ces génomes, corrélées avec une augmentation de l'expression des gènes modifiés dans tous les tissus des poissons. Enfin, le bouquet d'espèces du lac Victoria s'est révélé le plus récent.

c'est peu diversifiée, comme point de repère, et quatre espèces issues des grands lacs. Les résultats sont en cohérence avec les études morphologiques. Ainsi, trois gènes de développement (*bmp4*, *bmp1b* et *zog2*), connus pour jouer un rôle sur la forme des mâchoires, présentent une évolution accélérée chez les cichlidés des grands lacs, avec un taux élevé de mutations ponctuelles. De même, trois autres gènes, eux aussi avec un taux élevé de mutations ponctuelles, ont certainement joué un rôle majeur dans la diversification des cichlidés: l'un d'eux (*ednrb1*) affecte le

UNE ÉVOLUTION RAPIDE

En d'autres termes, les génomes des cichlidés des grands lacs portent les traces d'une évolution rapide, avec une sélection importante de quelques gènes clés et plusieurs mobilisations rapides de transposons. On entrevoit donc les rouages qui ont permis l'étonnante diversification de ces poissons. Mais quel en a été le déclencheur? C'est à cette question qu'a répondu l'équipe d'Ole Seehausen, de l'université de Berne, en 2017, en se focalisant sur les poissons du lac Victoria. Pour cela, elle a séquencé des génomes supplémentaires

(ou des portions susceptibles de présenter des mutations) en privilégiant les cichlidés du lac Victoria et de ses satellites, mais aussi ceux des bassins de drainage adjacents, c'est-à-dire du Nil supérieur, au nord, et du Congo, à l'ouest. Complété par des animaux venant du bassin versant est et des autres grands lacs, l'échantillonnage comptait 156 spécimens.

Cette très belle étude met en évidence un point capital, passé inaperçu: les cichlidés du lac Victoria sont le résultat d'une hybridation entre une lignée provenant du bassin du Nil et une autre, du bassin du Congo, et cette hybridation a joué le rôle de déclic pour l'évolution du bouquet d'espèces du lac Victoria.

UN ESSAIM D'HYBRIDATION

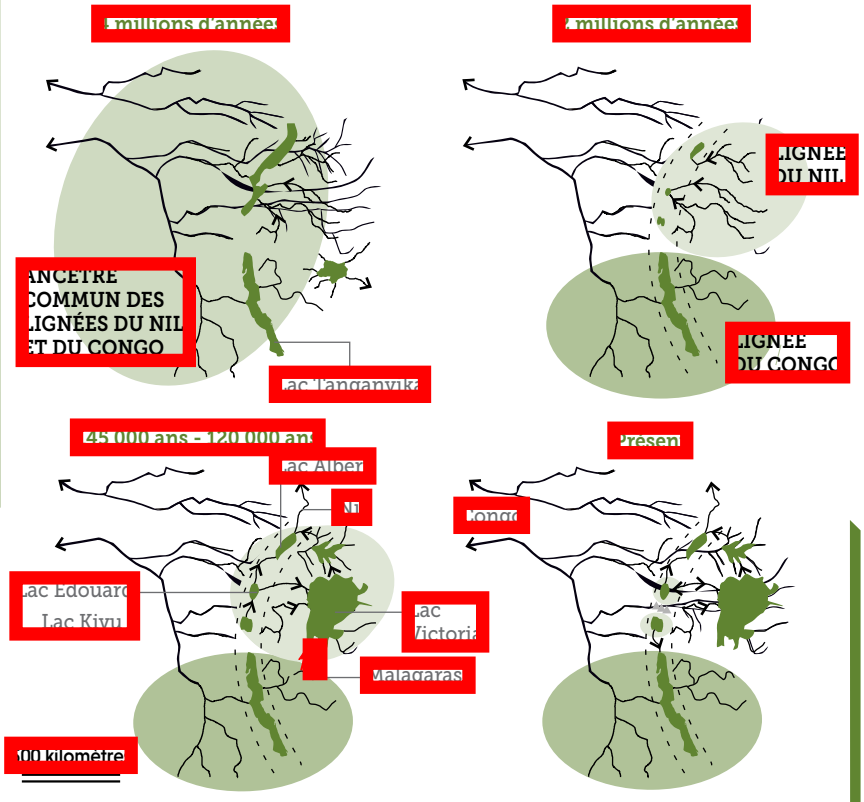
Cette hybridation explique une curiosité qui avait été incidemment citée dans la première analyse des génomes: les gènes prétendument dupliqués se ressemblent... un peu trop. Or quand un gène est dupliqué, une copie au moins évolue vite, allant même jusqu'à adopter un nouveau rôle. Avec l'hybridation, plus de problème: les différentes copies correspondent à une diversité ancestrale provenant d'une des lignées hybridées. Ainsi, il s'agit non pas de nouvelles copies soumises au jeu habituel de mutations et de sélections, mais de la mise en commun de gènes existants et donc déjà passés par ce crible. Tout peut donc aller très vite et fournir à l'animal hybride des gènes déjà testés chez un ancêtre.

De telles hybridations surviennent dans ce que les évolutionnistes appellent un essaim. Ce ne sont pas quelques individus qui sont entrés en contact, mais des populations entières provenant des deux lignées – Nil et Congo. Leur rencontre a produit un énorme brassage d'une diversité génétique déjà existante, laquelle s'est recombinée et a conduit à un bouquet d'espèces. L'étude des gènes des opsines des cichlidés victoriens en fournit une illustration étonnante. Ces protéines permettent la vision des couleurs: plus on en a, mieux on distingue les teintes. Or on s'aperçoit que ces poissons ont acquis toutes les possibilités de vision dans la colonne d'eau, de la surface aux profondeurs. De plus, la vision des couleurs a un rôle crucial lors des parades nuptiales, pour la reconnaissance des partenaires. Elle a ainsi certainement joué un rôle essentiel dans la spéciation. Enfin, l'hybridation a autorisé la mobilisation de transposons, entraînant un bouleversement génétique qui a surtout touché la régulation de l'expression des gènes. On comprend pourquoi cette diversification a été si rapide et si importante.

Comment les poissons du Congo et du Nil se sont-ils rencontrés? La géologie fournit une réponse (*voir l'encadré ci-dessus*). Il y a quatre millions d'années, le lac Victoria n'existait pas et toute la région drainait l'actuel Congo. Puis des mouvements géologiques ont isolé la région du lac Victoria, lequel s'est rempli et déversé vers le Nil. Mais plus tard, la capture, par cette région, d'un affluent du système de drainage congolais, le Malagarasi, a connecté à nouveau les deux bassins. Ainsi, les cichlidés des bassins du Nil et du Congo ont évolué indépendamment pendant des dizaines de milliers d'années avant d'être soudainement mis en contact. Curieusement, malgré cet isolement géographique, les animaux ont pu s'hybrider. C'est cet accident géologique fortuit qui a donné naissance à l'essaim d'hybridation, à la source de l'extraordinaire bouquet d'espèces du lac Victoria. ■

QUAND LE LAC VICTORIA S'EST REMPLI

Il y a 4 millions d'années, le lac Victoria n'existait pas et toute la région appartenait au système de drainage du Congo. Puis, il y a 2 millions d'années, les mouvements géologiques du rift africain ont isolé la région du lac Victoria. Il y a environ [illegible] de nouveaux mouvements géologiques ont modifié le cours d'écoulement de deux anciens affluents du Congo, qui ont alors rempli le lac, lequel s'est déversé vers le Nil. Enfin, il y a environ 140 000 ans, une période très humide a probablement reconnecté la région au système de drainage du Congo *via* la capture d'un affluent, le Malagarasi, et remis en contact les cichlidés des deux bassins.



BIBLIOGRAPHIE

D. A. Marques *et al.*, **A combinatorial view on speciation and adaptative radiation**, *TREE*, vol. 34(6), pp. 531-544, 2019.

J. Meier *et al.*, **Ancient hybridization fuels rapid cichlid fish adaptive radiations**, *Nat. Commun.*, vol. 8, article 14363, 2017.

D. Brawand *et al.*, **The genomic substrate for adaptive radiation in African cichlid fish**, *Nature*, vol. 513, pp. 375-381, 2014.

ABONNEZ-VOUS À

POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL 1 AN

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre *Une histoire de flou* de Pierre Léna (74651805)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de 102,80 € **43 %**	**79 €** Au lieu de 134,40 € **41 %**	**99 €** Au lieu de 194,40 € **49 %**

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 pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ **FORMULE PAPIER**
12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU
59€ ~~102,80€~~ A59FK

☐ **FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
+ UN CADEAU
79€ ~~134,40€~~ A79FK

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° du magazine (papier et numérique)
4 Hors-série (papier et numérique)
Accès illimité aux contenus en ligne
+ UN CADEAU
99€ ~~194,40€~~ A99FK

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

Signature obligatoire :

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 31/05/2020 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre Une histoire de flou pour 20,00 €.

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

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

RENOUVELER LE DÉLICE DE LA MOUTARDE

Le principal responsable du piquant de la moutarde classique peut constituer l'ingrédient de base de condiments analogues aux goûts nouveaux.

L'AUTEUR

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

Le piquant de la moutarde est surtout dû à l'isothiocyanate d'allyle. Partant de cet ingrédient, on peut inventer d'autres préparations analogues.

La moutarde doit son piquant à divers principes, mais le principal est l'isothiocyanate d'allyle. Celui-ci se forme quand des graines de moutarde sont broyées et que des enzymes myrosinases, libérées, agissent sur un glu[illegible] de l'enzyme dans la graine.

L'isothiocyanate d'allyle contribue également au piquant du radis, du cresson, du wasabi, du raifort. D'ailleurs, quand il est pur ou «dilué» dans de l'amidon, il donne aussitôt un piquant perçu comme celui du wasabi ou du raifort, selon la culture de celui ou celle qui le goûte.

Bien sûr, on pourrait utiliser cette dissolution solide comme du sel ou du poivre, en la saupoudrant, mais on perd alors l'idée du condiment qu'est la moutarde, ainsi que sa consistance dans la bouche. Peut-on reproduire la moutarde quand on dispose de l'isothiocyanate d'allyle (on le trouve chez les vendeurs de préparations qualifiées d'«aromatisantes» par la réglementation)?

La moutarde-condiment se distingue d'un simple piquant, car les graines de moutarde sont broyées avec des ingrédients variés: eau, vinaigre, jus de raisin vert, moût de raisin, vin... Ces derniers apportent bien plus que le piquant, à savoir des acidités variées (acétique, malique, citrique, succinique...), des sucres, du sel.

Bref, la moutarde peut être une belle composition, et il est dommage que les cuisiniers en aient laissé la fabrication à des industriels qui ne proposent pas toute la diversité possible. À partir d'isothiocyanate d'allyle, inventons alors un condiment qui s'apparente à la moutarde.

Il nous faut incorporer le principe piquant dans une préparation qui doit être pâteuse. L'adjectif «pâteux» évoque toujours une «suspension», c'est-à-dire une dispersion de particules solides dans un liquide. D'où plusieurs solutions évidentes.

Pour le liquide, il peut s'agir d'une solution aqueuse ou d'une matière grasse à l'état fondu. Pour les particules, on peut considérer, selon le «solvant» choisi, du sel, du sucre, des grains de farine ou de fécule, ou encore des fragments d'un gel. C'est la proposition faite, dans ces pages, sous le nom de «debye» et que l'on utiliserait ici de la façon suivante: on dissoudrait le composé piquant dans de l'eau, puis on gélifierait cette solution, avant de broyer le gel formé dans de l'eau ou dans de l'huile.

Mais il y a d'autres composantes gustatives que la réglementation autorise, voire invite à explorer: puisque, traditionnellement, on broie dans du vin ou du vinaigre les graines de moutarde (qui contiennent d'ailleurs de l'amidon, ce qui pourrait nous inciter à en utiliser), pourquoi ne pas placer, soit dans l'eau de dispersion, soit dans l'eau gélifiée, de l'acide acétique et de l'acide tartrique? Et n'oublions pas que les végétaux apportent bien souvent ces trois sucres que sont le glucose (qui contribue agréablement à la longueur en bouche), le fructose et le saccharose... Ces sucres sont d'ailleurs présents dans des condiments alsaciens, et l'on aurait tort de ne pas en utiliser le goût.

Et l'on voit ainsi se dessiner une recette... où l'on ne prend pas parti entre le choix de disperser de l'amidon et celui de faire un debye: on mêle les deux solutions! Sans oublier le sel.

Le nom de cette préparation? Ce ne peut pas être «moutarde», le produit traditionnel étant, à raison, réglementé. Aussi je propose de le nommer «cahours», du nom du chimiste français Auguste Cahours (1813-1891), qui fut un pionnier de l'étude des isothiocyanates. ■

LA RECETTE

1. A du vinaigre, ajouter environ 10 % en masse d'agar-agar, et porter à ébullition
2. Attendre le refroidissement de ce liquide et sa prise en gel.
3. Griller de la farine à sec dans une casserole.
4. Lui ajouter un peu d'eau et cuire doucement à couvert, pour empeser l'amidon.
5. Ajouter au gel d'agar-agar la farine torréfiée, de l'huile, du sel, du sucre, de l'acide tartrique, un colorant alimentaire, de l'isothiocyanate d'allyle, et mixer finement.

OFFRE NOËL

DURÉE LIBRE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre *Une histoire de flou de Pierre Léna* (74651805)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS

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.f

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

PAG19NOE

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

☐ FORMULE **PAPIER**
12 n° du magazine papier
+ **UN CADEAU**
4,90 € PAR MOIS

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

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

PV8E20K1

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
E-mail : ..... @ .....
(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte
Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur www.pourlascience.fr

P.52 MÈMES

Le théoricien de l'évolution Richard Dawkins a proposé ce terme en 1976. Il désigne « un élément culturel transmis ou imité ». Sur les réseaux sociaux, il décrit un contenu, généralement visuel, dont le rôle dans la désinformation a longtemps été sous-estimé du fait de son aspect ludique. En particulier, les partisans du président américain Donald Trump ont massivement utilisé les mèmes lors de sa campagne électorale.

P.40 55 KM/AN

C'est la vitesse à laquelle se déplace actuellement le pôle nord magnétique. Il est beaucoup moins contraint que le pôle sud magnétique, qui se déplace seulement de 10 kilomètres par an.

P.34

« *Le cancer doit réinventer la roue à chaque fois, car en dehors des cancers transmissibles, toute la diversité qu'il a produite chez un individu disparaît avec lui* »

FRÉDÉRIC THOMAS directeur de recherche

P.13 90 %

Depuis les années 1970, l'océan a absorbé plus de 90 % de l'excès de chaleur produit par l'effet de serre d'origine anthropique. Il a ainsi joué un rôle modérateur dans le réchauffement climatique.

P.74 TUNNEL GRAVITATIONNEL

On appelle « tunnel gravitationnel » la forme du puits qu'il faudrait creuser dans la Terre pour qu'un corps lâché depuis son ouverture tombe sans jamais toucher les parois. La rotation de la planète déviant cette chute vers l'est et le sud, si de tels tunnels étaient utilisés pour voyager d'un point du globe à un autre, ils ne pourraient être empruntés que dans un seul sens !

P.80 FORTITUDE

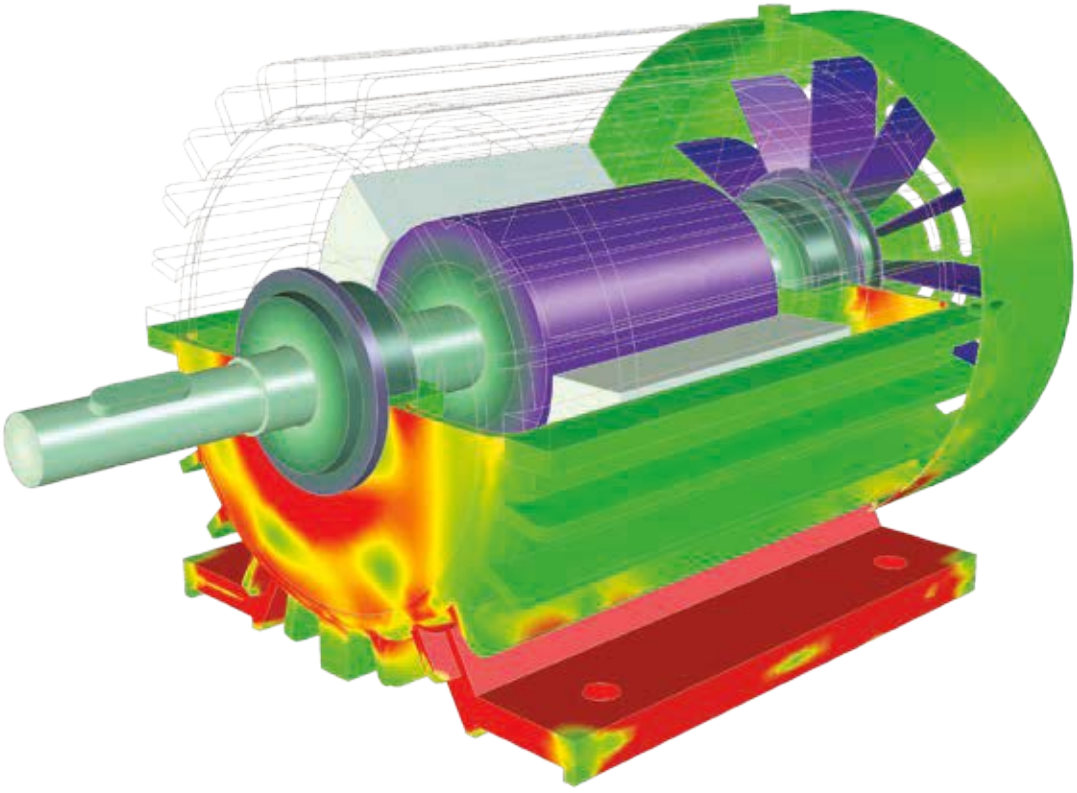
L'opération Fortitude, menée par les Alliés à la fin de la Seconde Guerre mondiale, était un vaste programme de désinformation visant à masquer le lieu du débarquement en Normandie et les forces impliquées. Qu'il s'agisse de camouflage ou d'un autre stratagème, les méthodes utilisées sont de l'« offuscation ».

P.22 2 500

D'après l'Unesco, il y a dans le monde environ 2 500 langues en danger d'extinction, sur les quelque 7 000 répertoriées. Par exemple, le kuuk-thaayorre, une langue d'aborigènes australiens, n'aurait plus que quelques dizaines de locuteurs.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Novembre 2019 – N° d'édition M07705505-01 – Commission paritaire n° 0922 K 87079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 236709 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mério

Inventé au 19ième 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 19ème 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

COMSOL

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.

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

www.ademe.fr/theses

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

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

CONCEPTION & RÉALISATION : OLFA NEMSI