POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

M 02687 - 508 F: 6,90 € RD

FÉVRIER 2020
N° 508

DOSSIER **ARCTIQUE**

LE CLIMAT REBAT LES CARTES

NEUROSCIENCES

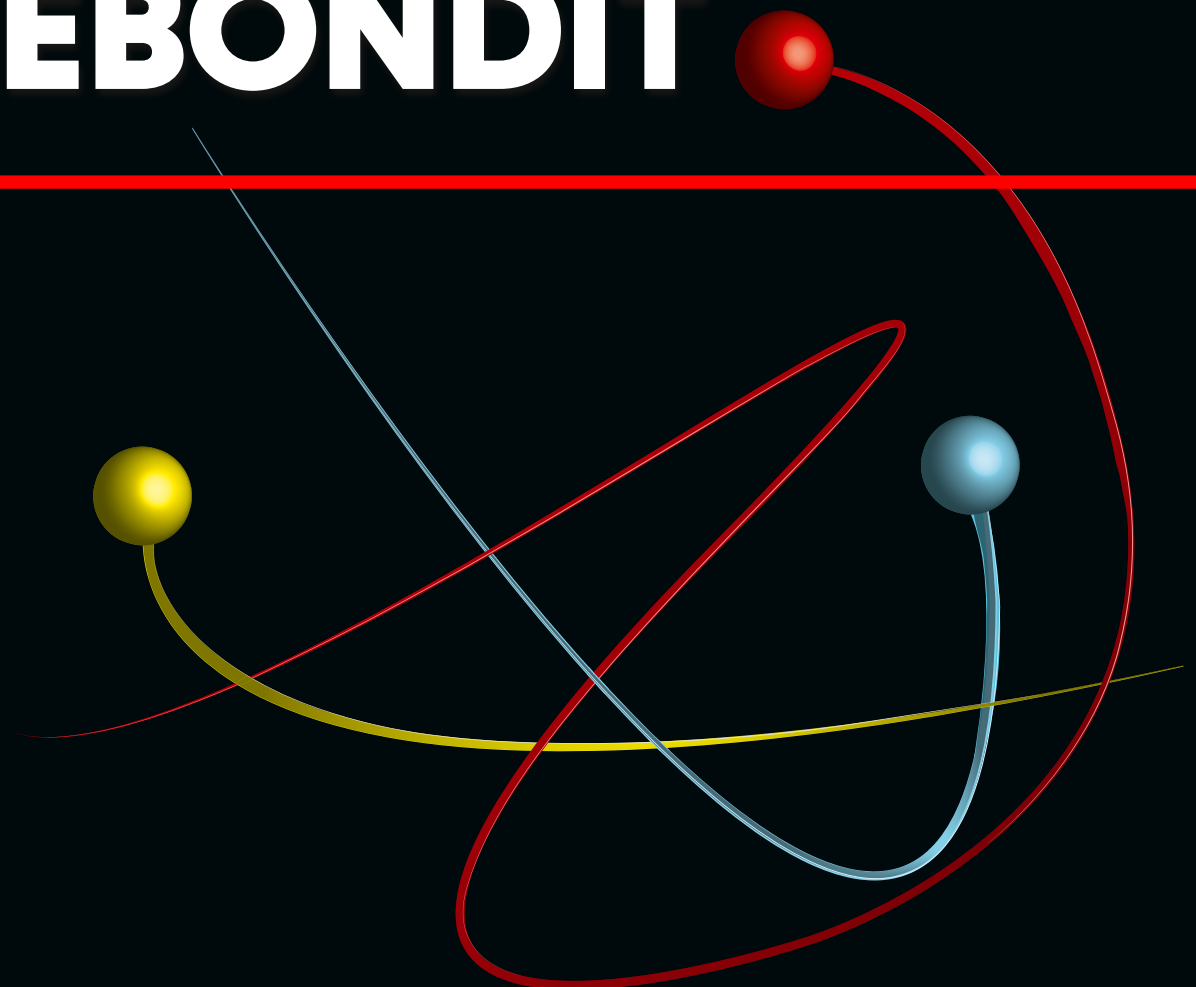
UNE MACHINE PEUT-ELLE ÊTRE CONSCIENTE ?

BIOLOGIE ANIMALE

LE SUPERPOUVOIR DE L'ANGUILLE ÉLECTRIQUE

Mathématiques

LE PROBLÈME DES TROIS CORPS REBONDIT



BEL : 7,6 € - CAN : 11,6 CAD - DOM/S : 7,7 € - Réunion/A : 9,9 € - ESP : 7,6 € - GR : 7,6 € - ITA : 7,6 € - LUX : 7,6 € - MAR : 64 MAD - TOM : 1040 XPF - PORT. CONT. : 7,6 € - CH : 12,7 CHF - TUN/S : 9,1 T

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

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Lucas Gierczak

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament, Véronique Marmont
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilagra
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Serge Berthier, Maud Bruguière, Yvan Castin, Alain Chenciner, Raphaël Covain, Sylvain Gandon, Antoine Loriot, Mikaa Mered, Marie-Agnès Petit, Serge Picaud, Gilles Pison, Frédérique Rémy, Alexis Rouillard, Pierre Sans-Jofre, Vincent Wieczny

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

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

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

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

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

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

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

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

ÉDITO



MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

UN PROBLÈME SIMPLE… À ÉNONCER

Les mathématiciens et les physiciens théoriciens éprouvent beaucoup de satisfaction lorsqu'ils trouvent à leurs équations des solutions à la fois exactes et « analytiques » – c'est-à-dire s'exprimant par des formules explicites où n'interviennent que des fonctions bien connues (comme l'exponentielle ou le sinus). Ces situations sont hélas exceptionnelles. L'une des exceptions importantes est le « problème des deux corps », qui consiste à déterminer les trajectoires suivies par deux masses ponctuelles s'attirant mutuellement selon la loi de gravitation énoncée par Isaac Newton. Ce même Newton avait résolu le problème et prouvé que les trajectoires en question sont des coniques (courbes formées par l'intersection d'un cône et d'un plan): cercle, ellipse, parabole ou hyperbole.

Passer du problème des deux corps à celui des trois corps, qui s'applique par exemple à un système composé d'une étoile et de deux planètes, était dans l'ordre naturel des choses. Mais le second s'est révélé infiniment plus coriace… Euler, Lagrange et d'autres mathématiciens brillants ont certes découvert quelques familles de solutions simples, dans des cas particuliers. Et il n'est pas exclu que l'on en trouve d'autres. On sait cependant que, pour le cas général, le combat est perdu d'avance.

Cela étant, le problème des trois corps ne se résume pas aux solutions analytiques: il existe d'autres approches fructueuses pour l'étudier. Ainsi, grâce aux méthodes numériques, les ordinateurs calculent des trajectoires avec une grande précision, notamment pour l'exploration spatiale. Et les analyses mathématiques plus qualitatives mènent parfois à d'importantes découvertes. Cela fut le cas à la fin du XIXe siècle avec Henri Poincaré et le chaos déterministe. Et ce mois-ci, le chercheur américain Richard Montgomery raconte tout le chemin qu'il a fait pour répondre, il y a peu, à une question relative aux éclipses dans le problème des trois corps (*voir pages 26 à 35*). Un riche parcours qui l'a conduit vers des contrées inattendues et fertiles… comme c'est souvent le cas avec les problèmes difficiles à énoncé simple. ■

SOMMAIRE

N° 508 /
Février 2020

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Le sucre, ennemi du sommeil et de la bonne humeur
- Séisme du Teil: l'activité minière en cause
- L'armure du phacochère
- Une scène de chasse vieille de 44000 ans
- Des vénus gravettiennes en Picardie
- Les premières mesures de *Parker* autour du Soleil
- Des nanoparticules d'or pas si stables
- Les interactions complexes de la truffe se révèlent
- Terre boule de neige: comment la vie a persisté
- Des poux sur les dinosaures à plumes

P. 18
LES LIVRES DU MOIS

P. 20
AGENDA

P. 22
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Et l'entropie devint information
Gilles Dowek

P. 24
QUESTIONS DE CONFIANCE
Que sont nos peurs nocturnes devenues?
Virginie Tournay



En couverture:
© Pour la Science

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

POUR LA SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LE PROLONGEMENT DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr

GRANDS FORMATS

DOSSIER

P. 51
ARCTIQUE
Le climat rebat les cartes





P. 52
GÉOSCIENCES
DIVISER POUR MIEUX RÉGNER
Mark Fischetti
Des États revendiquent des droits sur de vastes portions du fond marin de l'océan Arctique. Mais ces territoires se chevauchent...

P. 63
ENVIRONNEMENT
UNE RÉALITÉ MOUVANTE
Mark Fischetti
Le changement climatique modifie considérablement la vie au sommet du globe.





P. 36
BIOLOGIE ANIMALE
LES SUPERPOUVOIRS DE L'ANGUILLE ÉLECTRIQUE
Kenneth C. Catania
Les anguilles électriques produisent des tensions de plusieurs centaines de volts. Comment s'en servent-elles pour se défendre ou pour chasser leurs proies? Des expériences de laboratoire révèlent les étonnantes adaptations de ces gymnotes.

P. 44
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
LES MACHINES PEUVENT-ELLES ÊTRE CONSCIENTES?
Christof Koch
Nul doute que les robots et ordinateurs deviendront de plus en plus «intelligents». Mais auront-ils une subjectivité et un sentiment d'exister? Cette question est autrement plus débattue.

À LA UNE



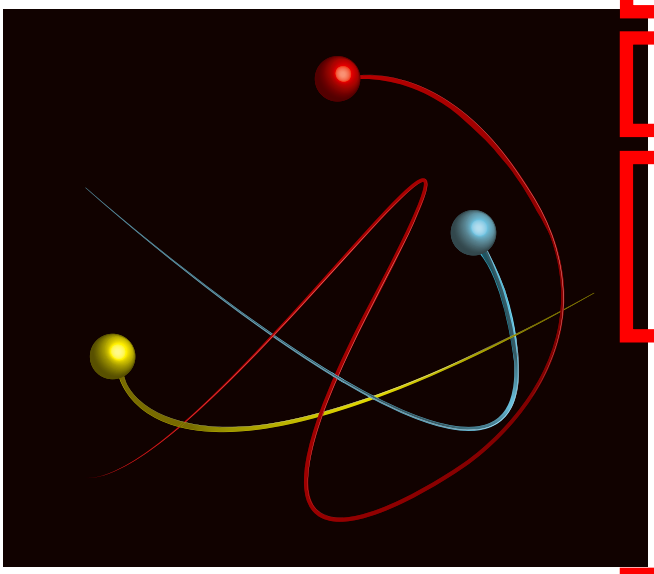
P. 66
SCIENCE ET SOCIÉTÉ
VERS UN RÉCHAUFFEMENT DIPLOMATIQUE ?
Kathrin Stephen

L'activité politique croît dans la zone Arctique, mais la coopération pourrait encore prévaloir.



P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES
LE MÉDECIN DE L'ÉPOQUE MODERNE FACE À LA DOULEUR
Raphaële Andrault et Ariane Bayle

Loin d'être négligée jadis, la douleur était déjà un sujet de préoccupation des médecins aux XVIe-XVIIIe siècles, comme le montre une exposition qui se tient jusqu'au 23 février à la bibliothèque de santé de la faculté de médecine Lyon Est.



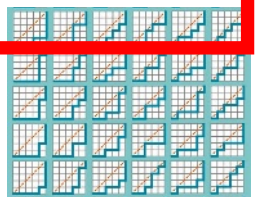
P. 26
MATHÉMATIQUES
LE PROBLÈME DES TROIS CORPS REBONDIT
Richard Montgomery

Déterminer les trajectoires de trois corps soumis uniquement à leur interaction gravitationnelle est un problème célèbre posé depuis plus de deux siècles. Les mathématiciens savent aujourd'hui qu'ils ne pourront jamais le « résoudre » complètement. Cependant, l'étude de cas particuliers a, encore récemment, donné lieu à des découvertes intrigantes.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL
LES SECRETS DU NOMBRE 42
Jean-Paul Delahaye

Comment un nombre parfaitement banal a attiré l'attention des amateurs de science-fiction, des *geeks*... puis des mathématiciens.



P. 86
ART & SCIENCE
Calanques année zéro
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
Froid ou chaud au toucher ?
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Les chétognathes trouvent enfin leur place !
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Des odeurs pour créer des saveurs
Hervé This

P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

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

SANTÉ

LE SUCRE, ENNEMI DU SOMMEIL ET DE LA BONNE HUMEUR



Manger une sucrerie avant de se coucher rassérène peut-être sur le moment, mais favoriserait aussi les troubles du sommeil et la dépression.

Une envie subite de sucre parce qu'il fait froid, que vous êtes déprimé, fatigué ? Mieux vaut s'abstenir si l'on ne veut pas aggraver ces troubles.

C'est l'hiver, vous êtes fatigué, déprimé, manquez de soleil et trouvez du plaisir à manger un bon morceau de chocolat au lait, un macaron ou une pâtisserie délicieusement sucrée avant de vous mettre au lit. Car vous espérez un bon sommeil réparateur. Malheureusement, vous ruminez vos soucis et n'arrivez pas à vous endormir. Et si tous ces problèmes – l'envie de sucre, l'humeur morose et l'insomnie – étaient liés? C'est ce que suggèrent deux études récentes: une alimentation sucrée a des conséquences négatives sur notre sommeil et notre bien-être psychologique.

Dans nos régions, en hiver, le manque de lumière du soleil perturbe les rythmes circadiens biologiques qui contrôlent nos périodes d'éveil et d'endormissement. Avec un effet négatif que ressentent environ 30% des adultes: une humeur et une énergie au plus bas, et même la dépression pour 5 à 10% de la population, selon Daniel Reis, de l'université du Kansas, aux États-Unis, et ses collègues. Que faire alors le remède? Manger quelque chose de sucré. Car l'ingestion de sucre procure effectivement un plaisir instantané qui soulage momentanément les symptômes dépressifs. Mais à long terme, c'est une autre histoire.

Dans une vaste revue de la littérature scientifique, les chercheurs américains ont en effet montré que la consommation de sucres ajoutés ou transformés amplifie les symptômes dépressifs en perturbant plusieurs fonctions de l'organisme.

D'abord, elle induit une inflammation systémique (de tout le corps): le sucre est une substance pro-inflammatoire, et l'inflammation a des effets négatifs sur le corps et le cerveau, augmentant le risque de souffrir de dépression. Ses effets sont aussi néfastes sur notre microbiote intestinal – les microorganismes qui peuplent les intestins; le sucre favorise le développement d'espèces pro-inflammatoires, et l'on sait que la flore intestinale a un impact sur la santé mentale.

D'autres mécanismes sont mis en avant: la résistance à l'insuline (l'hormone libérée pour diminuer la concentration

© Shutterstock.com/stockcreations

sanguine de sucre, ou glycémie), la pertu
bation du système cérébral de la récom
pense et du plaisir (car le sucre agit
comme une drogue), ainsi qu'un état de
stress cellulaire global.

Tous ces effets négatifs du sucre
expliquent peut-être aussi ses consé-
quences délétères sur le sommeil. Car la
pâtisserie avalée juste avant d'aller au lit
n'est pas une bonne chose, d'après James
Gangwish, de l'université Columbia, à
New York, et ses collègues, qui ont ana-
lysé l'alimentation de 50 000 femmes
pendant trois ans, ainsi que la qualité de
leur sommeil.

Les chercheurs ont distingué les
sucres consommés selon leur indice gly-
cémique, c'est-à-dire selon leur effet sur
la glycémie durant les deux heures sui-
vant l'ingestion. Les sucres hautement
raffinés, comme les sucreries, les bois-
sons sucrées, le pain blanc et le riz blanc
ont un indice élevé, car ils augmentent
tout de suite la glycémie, alors que les
sucres complexes, comme les glucides
des céréales complètes ou ceux des
fruits, ont un indice faible (les fibres
ralentissant l'absorption du sucre).

Ainsi, plus les femmes consom-
maient de sucres à indice glycémique
élevé, plus elles souffraient de troubles
du sommeil et d'insomnie. À l'inverse,
plus elles mangeaient de fruits et
légumes, mieux elles dormaient. Car la
hausse rapide de la glycémie entraîne la
sécrétion d'insuline, d'où une chute de
la glycémie qui provoque souvent la libé-
ration d'autres hormones, comme
l'adrénaline et le cortisol, des molécules
du « stress » et de l'agitation.

Il est donc certain, pour les cher-
cheurs, que trop de sucre en période
hivernale amplifie un mal-être général et
est susceptible d'augmenter le risque de
dépression et de troubles du sommeil,
sans que l'on sache vraiment quel est le
seuil maximal à ne pas dépasser. En effet,
en termes d'alimentation, chaque per-
sonne ne réagit pas de la même façon.
Les associations de santé américaines et
françaises, ainsi que l'OMS, suggèrent
toutefois que 25 grammes de sucres jour-
nalités par jour sont raisonnables. Une limite
hélas souvent vite dépassée... ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

D. J. Reis *et al.*, *Medical Hypotheses*, vol. 134, article 109421, 2020 ; J. E. Gangwisch *et al.*, *The American Journal of Clinical Nutrition*, en ligne le 11 décembre 2019

GÉOSCIENCES

Séisme du Teil : l'activité minière en cause ?

Le 11 novembre 2019, un séisme de magnitude 5,4 endommageait 825 logements et églises au Teil, dans le sud de l'Ardèche. Le CNRS a créé un groupe de travail pour rechercher ses causes possibles. Jean-Paul Ampuero, qui y participe, nous précise les premières conclusions de cette équipe.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

Pourquoi le CNRS a-t-il mis en place un comité d'experts pour ce séisme ?

La très faible profondeur de ce séisme de magnitude supérieure à 5 et le nombre particulièrement faible de ses répliques le rendaient atypique. Dès lors, le CNRS a souhaité que le phénomène et ses origines soient étudiés.

La tectonique l'explique-t-elle ?

Oui, en grande partie, puisque ce séisme résulte d'une rupture de la faille de Rouvière, nommée d'après l'un des hameaux du village du Teil. Cette faille se trouve dans une zone sismique connue, mais rarement active, ce qui explique la surprise générale à la survenue du séisme.

Quels mécanismes peuvent avoir mis la faille sous tension ?

Nous en voyons trois : la pression exercée sur la vallée du Rhône par la masse des Alpes proches ; l'érosion de la région se poursuivant toujours un peu après la disparition des énormes glaciers qui pesaient sur les Alpes il y a 20 000 ans ; l'érosion, qui a supprimé de la masse surmontant la faille. Ces effets sont si faibles que nous n'arrivons pas à les mesurer... C'est leur accumulation au cours d'une longue période qui explique l'énergie du séisme.

Mais il semble qu'une partie de l'érosion locale soit due aux activités humaines...

En effet, puisqu'une carrière surmonte la faille ! Avec l'aide de la société Lafarge qui exploite cette carrière, nos sismologues ont reconstitué les enlèvements de masse dans la zone depuis 1946, puis calculé et cartographié le surcroît de contraintes induit sur la faille. Il est très faible et n'explique en aucun cas la magnitude du séisme ; mais ce surcroît semble assez grand pour exercer une influence sur la tectonique.

Cela signifie-t-il que la carrière a déclenché le séisme ?

C'est une possibilité, que nous explorons en essayant de situer le point de départ du séisme. Prolongé depuis le fond à 30 degrés, la faille passe quelque 1 000 mètres sous la carrière, soit la profondeur estimée du séisme. Les calculs issus des données sismologiques placent son épicentre hors de la zone d'accroissement des contraintes sur la faille, mais le résultat change si l'on prend en compte l'enregistrement d'un sismomètre installé aux abords de la carrière par Lafarge pour surveiller les nuisances dues aux tirs de carrière. Compte tenu de cette donnée, l'épicentre est en plein dans la zone d'influence de la carrière...

Bref, les activités minières ont induit le tremblement de terre...

Nous concluons que c'est probable si et seulement si nous pouvons vérifier que toutes les incertitudes pesant sur l'enregistrement du sismomètre de Lafarge, qui ne provient pas de la surveillance sismique régulière, n'affectent en rien le calcul de la position de l'épicentre.

Si la société Lafarge était à l'origine du séisme, pourrait-on la considérer comme responsable de ses conséquences ?

Le groupe de travail formé par le CNRS n'a pas pour mandat d'exprimer une opinion là-dessus. Moi-même, non pas de sismologue mais de citoyen, je dirais qu'un exploitant ne peut être tenu pour responsable d'un événement considéré jusque-là comme impossible. Après avoir satisfait à de très nombreuses exigences, Lafarge venait d'obtenir l'autorisation d'étendre la carrière. Aucune de ces exigences techniques ne concernait un impensable risque sismique. C'est bien cela que ce cas plausible de sismicité induite par les activités humaines changera peut-être à l'avenir.

Séisme du Teil : rapport de la mission d'expertise du CNRS, en ligne le 17 décembre 2019, http://www.cnrs.fr/fr/rapport-de-la-mission-dexpertise-du-cnrs

MICROBIOLOGIE

L'ARMURE DU PHAGE

Le phage ΦKZ entoure son ADN d'une capsule de protéines lorsqu'il infecte une bactérie, ce qui permet de déjouer le système immunitaire de cette dernière.

Invisible à nos yeux, une guerre entre virus et bactéries fait rage depuis des millions d'années. Du côté des bactériophages (ou phages) – les virus « mangeurs de bactéries » – il s'agit d'introduire de l'ADN viral dans la cellule bactérienne pour détourner sa machinerie et lui faire produire d'autres virus. Les bactéries, elles, cherchent à bloquer au plus tôt l'action du virus, par exemple en détruisant son ADN à l'aide d'enzymes, des endonucléases. Senén Mendoza et Joseph Bondy-Denomy, de l'université de Californie à San Francisco, et leurs collègues se sont intéressés au phage géant ΦKZ qui infecte *Pseudomonas aeruginosa*, une bactérie particulièrement résistante aux antibiotiques et de plus en plus souvent responsable chez l'humain d'infections graves. Les chercheurs ont montré que, lors de l'infection, ce virus déjoue les stratégies immunitaires de la bactérie en protégeant son ADN par une capsule de protéines.

Les endonucléases constituent la principale ligne de défense chez les bactéries. Parmi elles, les systèmes CRISPR-Cas reconnaissent chacun une séquence spécifique de l'ADN viral et la coupent. Certains virus sont résistants à un de ces systèmes, mais cette immunité est très spécifique. Senén Mendoza et ses collègues ont soumis différents virus infectant *P. aeruginosa* à une dizaine de CRISPR-Cas distincts. Étonnamment, ΦKZ s'est révélé résistant à toutes les endonucléases. Le virus est même insensible à EcoRI, une endonucléase produite par *Escherichia coli*, une bactérie que par ailleurs il n'infecte pas !

Quel mécanisme confère à ce phage une immunité aussi étendue ? Serait-ce une autre de ces caractéristiques connue depuis 2017 : ce virus géant entoure son ADN d'une coquille protéique lors de l'infection ? Pour le savoir, Senén Mendoza et ses collègues ont modifié des souches de *P. aeruginosa* pour qu'elles produisent des endonucléases fluorescentes. Grâce à cela, ils ont confirmé que les endonucléases de la bactérie étaient effectivement incapables de franchir la barrière protéique du virus. Toutefois, les chercheurs ont constaté que d'autres molécules continuaient de traverser cette coque : des protéines, comme ORF152,



Comprendre les interactions des bactéries et de leurs virus, les phages, est crucial à l'heure où l'antibiorésistance devient un problème de santé publique.

nécessaires aux virus notamment pour se dupliquer. L'armure de ΦKZ semble donc aussi jouer le rôle d'un filtre moléculaire.

Afin de s'en assurer, Senén Mendoza et ses collègues ont alors eu l'idée de fusionner l'enzyme EcoRI avec ORF152. Les bactéries *P. aeruginosa* produisant cette molécule hybride se sont révélées cinq fois plus résistantes aux bactériophages ΦKZ. De plus, des expériences de fluorescence ont confirmé que la molécule EcoRI-ORF152 traversait l'enveloppe protéique et digérait l'ADN viral.

L'armure du virus ΦKZ lui confère donc une résistance particulière aux défenses immunitaires bactériennes. Un nouveau pas vers la phagothérapie (l'utilisation des bactériophages pour endiguer les infections bactériennes), à l'heure où le développement de l'antibiorésistance devient un problème de santé publique. ■

CORALINE MADEC

S. Mendoza *et al.*, *Nature*, vol. 577, pp. 244-248, 2020

© Shutterstock.com/nobeastsofierce

EN BREF

L'*ERECTUS* INDONÉSIEN REDATÉ

À Java, le site de Sangiran a livré le plus ancien *Homo erectus* indonésien. La datation argon-argon le plaçait à 1,6 million d'années, mais l'équipe de Shuji Matsu'ura, du Muséum national de Tsukuba, au Japon, vient d'infirmer cet âge. En combinant deux méthodes de datation, ces chercheurs ont établi que l'âge du tuff volcanique sous-jacent à la strate fossilifère n'excède pas 1,3 million d'années, ce qui est donc l'âge maximal possible du plus vieil *H. erectus* indonésien.

Science, 9 janvier 2020

UN AUTRE SURSAUT RADIO RÉPÉTITIF

Les sursauts radio rapides sont des éclairs radio extragalactiques, brefs et lumineux d'origine inconnue, certains répétitifs. Parmi la centaine de sources repérées, seulement quatre, dont une répétitive, ont été localisées dans une galaxie. Benito Marcote, du Consortium européen pour l'interférométrie à très longue base, vient de localiser une seconde source répétitive au sein d'une galaxie spirale massive, très différente des sources connues. Il y a de la diversité dans les sursauts radio rapides !

Nature, 6 janvier 2020

T. REX ADOLESCENTS

Autour de Holly Woodward, de l'université de l'Oklahoma, une équipe vient de réétudier la microstructure osseuse du fémur et du tibia de deux petits spécimens de tyrannosaures, sur la base desquels des paléontologues avaient défini une espèce naine, nommée *Nanotyrannus*. Il s'avère qu'il s'agissait d'individus immatures, dont la croissance annuelle dépendait de l'abondance en ressources, et que l'on ne pousse à considérer comme des adultes nains. Il s'agissait en fait de *Tyrannosaurus rex* adolescents.

Sci. Adv., 1er janvier 2020

MÉDECINE

UNE MEILLEURE RÉTINE ARTIFICIELLE

Près d'un tiers des personnes de plus de 75 ans sont concernées en France par la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), une dégradation progressive de la rétine qui conduit à la perte de la vision centrale. Dès lors le besoin de développer pour ces malades une rétine artificielle. Dans cette optique, des chercheurs de l'Institut de la vision, menés par Serge Picaud, de l'Inserm, élaborent avec la société Pixium Vision une très prometteuse prothèse nommée Prima. L'idée est de remplacer les photorécepteurs de la rétine, perdus dans ces pathologies, par une stimulation électrique du tissu résiduel avec des électrodes posées sur ou sous la rétine.

« Dans les précédents modèles commercialisés, le courant doit revenir à une masse commune distante, ce qui entraîne une diffusion très large des courants. Le recouvrement des zones stimulées par des électrodes voisines entraîne une mauvaise résolution finale », décrypte Serge Picaud. L'implant Prima intègre, lui, une grille de masse en nid d'abeille entourant chacune des électrodes au centre d'une alvéole. Les courants électriques sont directement récupérés sur cette grille de masse et empêchent ainsi la diffusion vers une électrode voisine.



© Martina Bardini/Shutterstock

Les malades atteints de DMLA perdent la vision centrale, que des rétines artificielles permettraient de récupérer.

Après des essais concluants sur un modèle de macaque, le dispositif a été implanté chez cinq patients atteints de DMLA. La prothèse positionnée sous la rétine est activée à distance en lumière infrarouge par des lunettes équipées d'une minicaméra et d'un projecteur d'images. « Trois patients retrouvent peu à peu une vision centrale et parviennent déjà à lire des lettres et des mots », précise Serge Picaud. D'autres essais cliniques seront lancés cette année. ■

NOËLLE GUILLON

P.-H. Prévot *et al.*, *Nature Biomedical Engineering*, en ligne le 2 décembre 2019.

PRÉHISTOIRE

UNE SCÈNE DE CHASSE DE 44 000 ANS

Sur l'île indonésienne des Célèbes, Maxime Aubert, de l'université Griffith en Australie, et des collègues ont découvert la plus ancienne œuvre figurative connue. Elle se trouve dans la grotte de Sipong 4, dans la région karstique de Maros-Pangkep, un paysage spectaculaire de tours et de falaises calcaires du sud de l'île. Six minuscules chasseurs affrontent, cordes et lances à la main, un énorme bovidé. Sur le même panneau, d'autres traquent d'autres bovidés ainsi que des cochons sauvages. Tous semblent humains, mais ils présentent plusieurs traits animaux : une queue, un bec… De tels êtres mi-humains mi-animaux, ou « thérianthropes », sont considérés comme des marqueurs de spiritualité. Les chercheurs ont daté par la méthode uranium-thorium des dépôts de calcite recouvrant partiellement



© Ratno Sardi

Dans la plus ancienne peinture rupestre connue, découverte dans l'île des Célèbes, des êtres mi-humains mi-animaux semblent en train de chasser un gros bovidé.

l'œuvre. Des valeurs obtenues, ils concluent que le panneau de la grotte Sipong 4 a au moins 43 900 ans – un record. ■

F. S.

M. Aubert *et al.*, *Nature*, vol. 576, pp. 442-445, 2019

DES VÉNUS GRAVETTIENNES EN PICARDIE

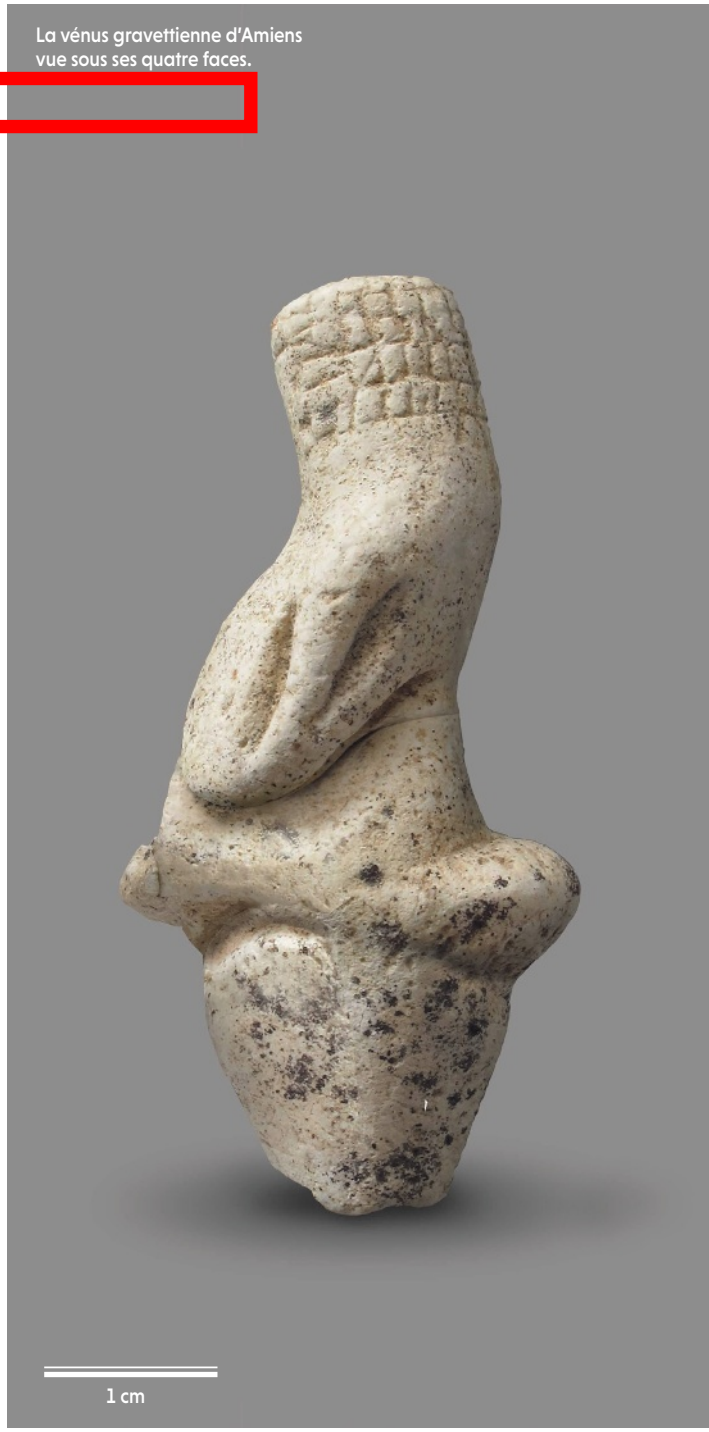
À national de recherche en archéologie préventive (Inrap), vient de mettre au jour un campement de chasseurs de chevaux magnifiquement conservé. Outre de nombreuses traces d'activité, les archéologues ont retrouvé dans cette station de plein air du Gravettien (culture datant de 31 000 à 22 000 ans) une quinzaine de statuettes éclatées par le gel. Une d'entre elles n'était cassée qu'en trois morceaux, qui ont pu être rapidement réassemblés (*ci-contre*) et former en quelque sorte la « Miss Picardie de l'année – 27000 » !

Cette sculpture a tous les attributs d'une beauté des temps gravettiens : une poitrine généreuse, de grosses cuisses, des fesses volumineuses et un ventre bombé – peut-être celui d'une femme enceinte. Les bras sont à peine esquissés et les jambes tronquées sous les genoux. Le visage est absent, ce qui est presque toujours le cas sur les figurines de cette culture.

Quelle était la fonction de telles statuettes ? Manifestement, elles ne représentent pas les Gravettiennes du quotidien, qui étaient sans doute aussi chaudement vêtues que des femmes inuits. Pour les préhistoriens, il s'agit d'amulettes liées à la reproduction valorisant le type de physique féminin particulièrement apte à surmonter une maternité, puis à assurer la survie de l'enfant dans les températures glaciales de l'époque : des femmes bien en chair… ■

F. S.

Communiqué de l'Inrap, 4 décembre 2019
www.inrap.fr/decouverte-d-une-venus-paleolithique-amiens-14779



La vénus gravettienne d'Amiens vue sous ses quatre faces.

© Stéphane Lancelot / Inrap



Le site gravettien d'Amiens-Renancourt est très bien préservé, car il se trouvait sous 4 mètres de lœss et au-dessus de 4 mètres de sédiment éolien très fin, accumulé en masse à la périphérie des glaciers.

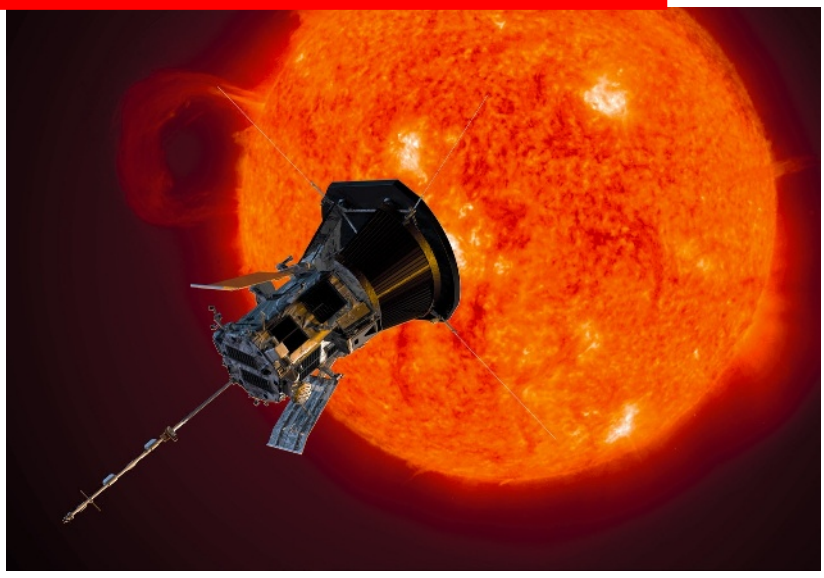


ASTROPHYSIQUE

LES PREMIÈRES MESURES DE PARKER AUTOUR DU SOLEIL

La sonde *Parker*, lancée en 2018, survole le Soleil de près. Ses premières mesures suggèrent que le champ magnétique de l'étoile est plus complexe qu'on ne le pensait.

Parfois, ce ne sont pas les mondes les plus lointains qui recèlent les plus grands mystères. Beaucoup de questions à propos du Soleil, 250 000 fois plus près que la deuxième étoile la plus proche de nous, restent aujourd'hui sans réponse. Par exemple, on ne sait pas pourquoi la couche de gaz située autour du Soleil est 200 fois plus chaude que la surface de l'étoile elle-même. C'est pour répondre à ces questions, et mieux connaître cet astre en général, que la sonde *Parker* (ou PSP, pour *Parker solar probe*) a été lancée par la Nasa en août 2018. Dotée d'une batterie d'instruments scientifiques de haute précision, elle réalise la mission d'exploration la plus proche du Soleil jamais réalisée. Les premières données recueillies ont déjà été exploitées par une équipe constituée majoritairement de scientifiques américains et français; les résultats sont surprenants, notamment sur la forme des lignes de champ magnétique du Soleil, qui présenteraient des «méandres».



La sonde *Parker (ici une vue d'artiste)* réalise une mission de plus de sept ans durant laquelle elle s'approchera, au total, 26 fois du Soleil. L'objectif ? Étudier le vent et la couronne solaires.

Pour étudier le champ magnétique solaire, *Parker* s'est déjà approchée plusieurs fois très près du Soleil – une fois par révolution –, la quatrième étant prévue ce 29 janvier pour une distance d'environ 28 rayons solaires, soit 19 millions de kilomètres. À la grande surprise des chercheurs, le champ magnétique de l'astre, enregistré pendant plusieurs semaines par la suite d'instruments Fields, a subi des inversions très fréquentes, changeant parfois de polarité toutes les quelques minutes. Une équipe a également étudié les particules du vent solaire durant ces inversions, grâce à l'instrument Sweap. Le vent solaire est un flux de particules chargées électriquement – surtout des électrons et des protons –, provenant de l'atmosphère du Soleil et éjectées dans l'espace. Sweap a mesuré les caractéristiques de ces particules accélérées à des vitesses très importantes à proximité de l'étoile, et les chercheurs en ont déduit que les inversions du champ magnétique surviennent conjointement à des jets de particules supersoniques alimentant le vent solaire. Ces deux phénomènes corrélés proviendraient d'éruptions solaires qui seraient aussi impliquées dans le processus de chauffage de la couronne solaire, cette région externe et diffuse de l'atmosphère de l'étoile dont la température est étonnamment élevée – de l'ordre du million de degrés.

Deux autres séries de mesures ont étonné les astrophysiciens. L'instrument Isis détecte des particules très énergétiques qui se déplacent beaucoup plus vite que le plasma du vent solaire. Des mesures relatives à leur trajectoire suggèrent que le champ magnétique solaire a une forme beaucoup plus complexe qu'on ne le pensait. Les scientifiques estiment ainsi que les lignes de champ sont déformées par des événements proches du Soleil et comportent des motifs en «S»: elles «font demi-tour». En outre, les images fournies par l'instrument Wispr ont révélé une couche proche du Soleil totalement dépourvue de poussières interstellaires. Toute une série de découvertes intéressantes qui ne sont que le début de l'aventure *Parker*, prévue pour durer encore six ans. ■

$6{,}9 \times 10^6$ kilomètres

C'EST LA DISTANCE À LAQUELLE *PARKER* S'APPROCHERA DU SOLEIL AU PLUS PRÈS, LORS DE SA 26e APPROCHE, LE 12 DÉCEMBRE 2025. AVANT LE LANCEMENT DE CETTE SONDE, LE RECORD ÉTAIT DÉTENU PAR *HELIOS 2*, QUI, EN 1976, S'ÉTAIT APPROCHÉE À ENVIRON 43 MILLIONS DE KILOMÈTRES DE L'ÉTOILE, SOIT SIX FOIS PLUS LOIN.

LUCAS GIERCZAK

D. McComas *et al.*, *Nature*, vol. 576, pp. 223-227, 2019 ;
J. C. Kasper *et al.*, *ibid.*, pp. 228-231 ;
S. D. Bale *et al.*, *ibid.*, pp. 237-242

© Nasa/Johns Hopkins APL/Steve Gribben

BIOLOGIE

UN GROS BEC PARADOXAL

Selon une règle biologique empirique, la règle d'Allen, les animaux vivant dans le froid ont des appendices plus courts que ceux des milieux chauds, car cela leur permet de garder leur chaleur corporelle. Pourtant, le macareux huppé (*Fratercula cirrhata*), un oiseau du nord du Pacifique, a un gros bec. À l'aide d'une caméra thermique, Hannes Schraft, de l'université de San Diego, en Californie, et des collègues ont mesuré la température du bec et du dos de 50 macareux tout juste posés. Ils constatent que, 30 minutes après l'atterrissage, elle n'a pas changé sur le dos, mais a baissé de 5 °C sur le bec. Ce gros appendice présente ici l'intérêt d'évacuer efficacement la chaleur corporelle excessive du macareux, accumulée durant son vol, très énergivore. ■

SOPHIA CONDEMI-PIGNÈDE

H. A. Schraft *et al.*, *Journal of Experimental Biology*, vol. 222, article 212563, 2019

PALÉONTOLOGIE

LA FORÊT LA PLUS ANCIENNE

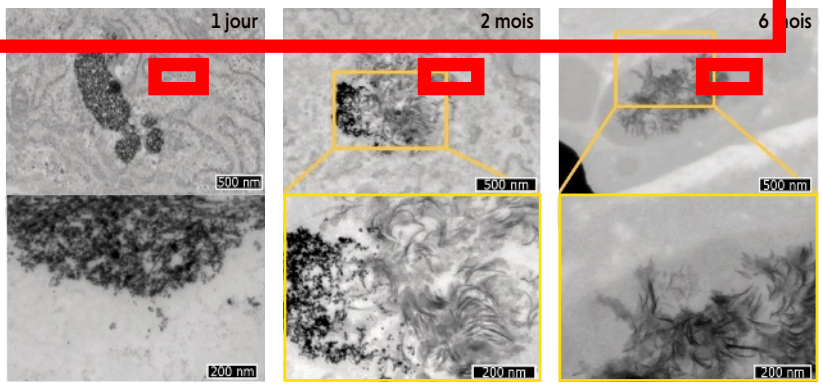
Il y a entre 399 et 382 millions d'années, au Dévonien moyen, la Terre a subi des changements considérables. La composition de l'atmosphère, le climat et la couverture végétale ont évolué très rapidement – marquant notamment l'apparition des arbres –, mais les effets respectifs de ces facteurs restent mal connus. William Stein, de l'université d'État de New York à Binghamton, et ses collègues ont mis au jour, dans l'État de New York, des fossiles de plusieurs végétaux. Outre des fougères anciennes, ils ont identifié des arbres du genre *Archaeopteris*, vieux de 386 millions d'années – ce qui fait du site la plus vieille forêt fossile connue. Dotés de systèmes racinaires larges d'une dizaine de mètres, ces végétaux sont considérés comme les premiers arbres modernes, proches des plantes à graines. Une découverte qui précise leur rôle charnière dans l'évolution de la biosphère. ■

L. G.

W. E. Stein *et al.*, *Current Biology*, en ligne le 19 décembre 2019

BIOPHYSIQUE

DES NANOPARTICULES D'OR PAS SI STABLES



Ces images de lysosomes obtenues par microscopie électronique à transmission montrent, à deux grossissements différents et à différents moments (1 jour, 2 mois et 6 mois) après l'incorporation des nanoparticules d'or, la raréfaction des nanoparticules initiales et l'apparition progressive de structures plus diffuses, où l'or se présente sous forme de feuillets constitués de nanoparticules plus petites qu'initialement.

Alors que l'intérêt pour les nanoparticules d'or appliquées à la médecine est en plein essor, on en sait peu sur le devenir à long terme de ces objets dans le corps humain. On les supposait biologiquement inertes, se stockant indéfiniment dans les tissus sans en altérer la structure. Cependant, une équipe menée par Florence Gazeau et Florent Carn, de l'université de Paris, a découvert qu'au bout de quelques mois, les nanoparticules finissent par se dissoudre avant de recristalliser sous une forme différente.

Les chercheurs ont incubé des cellules humaines avec des nanoparticules [illegible] pendant trois heures. Puis ils ont examiné au microscope électronique ces cellules pendant plus de six mois, en en prélevant un échantillon à plusieurs moments différents.

Après 24 heures, les nanoparticules d'or se trouvent séquestrées, sans altération, dans les lysosomes des cellules, ces compartiments étanches qui servent, dans ce cas, de « poubelles » cellulaires. En revanche, les semaines suivantes, les nanoparticules initiales se raréfient tandis que se multiplient, toujours dans les lysosomes, des structures plus diffuses et plus étendues. Par microscopie électronique à transmission à haute résolution, les chercheurs ont mis en évidence que ces structures diffuses, qui semblent stables, se composent de feuillets formés de nanoparticules d'or de 2,5 nanomètres.

Afin de saisir le mécanisme de cette transformation, l'équipe parisienne a voulu déterminer les gènes particulièrement actifs lors de ce processus. Les premiers à être activés correspondent à des enzymes de type oxydase, dont le rôle est de dissoudre les corps étrangers dans les lysosomes : en produisant des dérivés très réactifs de l'oxygène, elles transforment l'or métallique en ions Au^+, solubles dans l'eau. Puis des protéines d'un autre type, les métallothionéines, entrent en jeu. Comme elles contiennent de nombreux atomes de soufre, qui a une forte affinité avec l'or, elles contribuent à la biocristallisation de l'or et à l'agencement final de ces structures nanocristallines en feuillets.

Ces travaux mettant en question l'inaltérabilité de l'or dans les cellules, les chercheurs doivent désormais étudier l'impact de cette dégradation sur la toxicité éventuelle et l'élimination des nanoparticules d'or dans l'organisme. ■

MARTIN TIANO

A. Balfourier *et al.*, *PNAS*, vol. 117(1), pp. 103-113, 2020

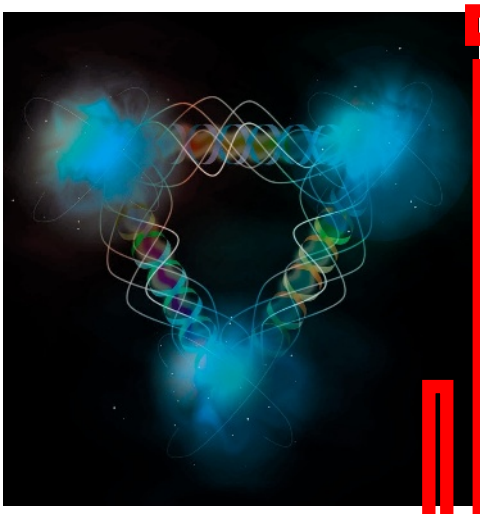
© A. Balfourier et al., PNAS, vol. 117(1), pp. 103-113, 2020

PHYSIQUE

TRIOS D'ATOMES IRRÉGULIERS

L'effet Efimov est un phénomène quantique surprenant : trois atomes identiques se lient de façon stable, là où deux seulement n'auraient pas fait bon ménage. Prédites par le physicien russe Vitaly Efimov en 1970, ces configurations ont été observées expérimentalement à partir de 2006. Une grandeur semblait indépendante de l'espèce atomique considérée : le rayon de l'état fondamental. Cette uniformité est aujourd'hui tempérée par Eric Cornell, de l'université du Colorado, aux États-Unis, et ses collègues, qui viennent de faire une mesure de rayon incompatible avec cette règle d'universalité.

Des forces électromagnétiques s'exercent entre des atomes proches : leur portée est décrite par la longueur de Van der Waals, propre à chaque élément. Avec deux atomes, la configuration n'est pas forcément stable, mais l'ajout d'un troisième stabilise parfois le système, en formant un triangle équilatéral d'atomes identiques nommé « état d'Efimov ». Comme ce phénomène est de nature quantique, l'ensemble des tailles (ou rayons) de ces états d'Efimov est discret : ces configurations sont soit dans l'état fondamental – avec un rayon minimal – soit dans un des états excités possibles, plus grands en taille. C'est le rapport de ce rayon minimal par la longueur de Van der



© Shutterstock.com/scifyt

Dans un état d'Efimov, trois atomes identiques se lient de façon stable à très basse température.

Waals qui est universel, comme l'ont confirmé des modèles théoriques. Mais les expériences d'Eric Cornell et ses collègues remettent en question cette universalité. Avec des atomes de potassium 39, ces chercheurs ont obtenu une mesure très précise de ce rapport : environ 14. Une déviation qu'ils ont expliquée par un nouveau modèle plus réaliste. ■

L. G.

R. Chapurin *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 123, article 233402, 2019

BIOPHYSIQUE

L'ARMURE FLEXIBLE DES CHITONS

La nature est une source d'inspiration essentielle pour les ingénieurs : la ventouse ou le Velcro sont des exemples frappants de biomimétisme réussi. Matthew Connors, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, et son équipe ont cette fois étudié les écailles arborées par certains mollusques marins, les chitons, et montré qu'elles leur assuraient une défense contre les prédateurs susceptible d'inspirer des protections pour les humains. Ces animaux disposent d'une carapace articulée constituée de sept ou huit plaques rigides entourée d'une ceinture musculaire. Or cette dernière conjugue deux avantages difficiles à concilier : une forte résistance à la pénétration d'objets piquants ou tranchants, et une grande déformabilité. Une prouesse rendue possible par les écailles, courbées, rigides et coulissantes,



© Shutterstock.com/Gerald Robert Fischer

La ceinture musculaire des chitons est tapissée d'écailles rigides coulissantes qui résistent à la pénétration.

mesurant entre 100 et 500 micromètres en hauteur, qui recouvrent la ceinture : un objet pointu glisse sur la surface des écailles et se coince entre elles. ■

L. G.

M. Connors *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 5413, 2019

EN BREF

MINI-ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES

Les accélérateurs de particules sont en général très longs, et on cherche à les miniaturiser. Neil Sapra, de l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont construit un accélérateur de quelques dizaines de micromètres de long à partir d'un bloc de silicium. Les électrons y sont accélérés à une énergie de près de 1 kiloélectronvolt par des impulsions laser infrarouges se faufilant à travers des nanostructures creusées dans le métal. Une énergie modeste en valeur absolue, mais très élevée par rapport à la longueur d'accélération.

Science, vol. 367, pp. 79-82, 2020

TREMBLEMENTS DE MARS

Après que les scientifiques ont détecté des séismes sur la Lune dans les années 1970, c'est au tour de Mars ! Les sismomètres de la mission d'exploration *InSight*, de la Nasa, ont en effet mis en évidence un grand nombre de séismes d'une magnitude jusqu'à 4 – plus de 300 en un peu plus d'un an. L'étude de ces secousses met en évidence des zones géologiquement actives à l'intérieur de la planète et renseigne sur les différentes couches de sa structure interne.

POURQUOI DES CREVETTES GÉANTES ?

La taille des animaux est notamment contrainte par la quantité d'énergie obtenue en se nourrissant. En étudiant le comportement de plus de cent baleines, Jeremy Goldbogen, de l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que la taille considérable de ces mammifères est permise par le peu d'effort qu'leur demande la capture du krill – abondant et concentré dans l'espace et le temps – par rapport à l'énergie apportée par ces crevettes.

Science, vol. 366, pp. 1367-1372, 2019

LES INTERACTIONS COMPLEXES DE LA TRUFFE SE RÉVÈLENT

La truffe pousse grâce à une symbiose avec un arbre, mais elle serait aussi connectée à d'autres plantes. Ce réseau expliquerait le « brûlé » autour de l'arbre hôte.

En France, la production de la truffe noire du Périgord (*Tuber melanosporum*), un champignon prisé pour son organe charnu et son puissant parfum, n'est que de 10 % de ce qu'elle était en 1900. Aujourd'hui, la majorité des truffes sont obtenues par inoculation de plantations d'arbres avec ces champignons. Mais le résultat est souvent incertain. Il y a donc un enjeu crucial à comprendre ce qui favorise la croissance de la truffe. Celle-ci se développe grâce à une symbiose avec un arbre, interaction qui ne semble cependant pas exclusive. En effet, autour de l'arbre hôte, on observe souvent une zone de « brûlé » où les plantes sont moins denses et moins diverses. Pour en comprendre l'origine, Marc-André Selosse, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et ses collègues de l'Inrae de Dijon, Montpellier et Nancy, ont étudié comment la truffe établit des relations avec les plantes environnantes.

Les producteurs de truffes ont développé une connaissance empirique des facteurs qui favorisent la croissance de leurs champignons. Par exemple, ils ont constaté que certaines « plantes compagnes » avaient un effet positif sur le développement de la truffe noire. Pour préciser ce rôle, les chercheurs ont étudié, en milieu contrôlé, 140 jeunes chênes verts (*Quercus ilex*), soit seuls, soit encadrés par deux plantes compagnes d'une même espèce (parmi six dans l'étude). La moitié des arbres étaient inoculés avec de la truffe noire. L'équipe a alors suivi la croissance des plantes et du mycélium, les filaments microscopiques de la truffe, dans les différents cas.

La symbiose entre la truffe et l'arbre se fait par l'interaction du mycélium et des racines de l'arbre. La truffe procure de l'azote et du phosphore à l'arbre et se nourrit en retour de la matière organique (des sucres) synthétisée par ce dernier. Quel serait alors le rôle des plantes compagnes ? Une hypothèse déjà avancée est que les truffes parasiteraient les ressources de ces plantes, limitant ainsi leur croissance, ce qui expliquerait en partie le brûlé. Dans une première étude, l'équipe de Marc-André Selosse a montré que le mycélium des truffes



Ce ciste cotonneux (*Cistus albidus*) est en symbiose avec une truffe. Ce dernier interagit aussi avec les plantes voisines. Ce faisant, il les prive d'azote et de phosphore et limite leur croissance. Il se forme une zone pauvre en plantes nommée « brûlé ».



Cette observation au microscope confocal de racines de luzerne révèle la présence de mycélium de truffe (*en rouge*).

du brûlé.

Dans leur milieu contrôlé, les chercheurs ont constaté que, dans les systèmes inoculés avec des truffes, les plantes compagnes ont toujours un rôle positif sur le développement de la truffe, et cela pour toutes les espèces testées (même celles réputées néfastes). Et effectivement, les plantes compagnes se développent moins en présence de ces champignons, qui les priveraient d'azote et de phosphore. Le chêne semble profiter également, de façon indirecte, de ce détournement de ressources.

Par ailleurs, les truffes inhiberaient la germination spontanée de graines apportées par le vent. La combinaison de tous ces effets suffit à expliquer l'origine du brûlé autour de l'arbre hôte. Cependant, les mécanismes précis de l'interaction des truffes avec les plantes compagnes et les graines en germination restent à éclaircir. ■

L. Schneider-Maunoury *et al.*, *New Phytologist*, 16 novembre 2019 ; E. Taschen *et al.*, *Plants and Soil*, [illegible]

GÉOSCIENCES

TERRE BOULE DE NEIGE : COMMENT LA VIE A PERSISTÉ

Les conditions très rudes de l'épisode glaciaire survenu sur Terre il y a 650 millions d'années n'ont pas éradiqué la vie. Peut-être grâce aux glaciers.

Une énorme boule de neige... C'était probablement l'apparence de la Terre lors de la glaciation marinoenne, un épisode de refroidissement global qui a débuté il y a environ 650 millions d'années. Durant plus de 10 millions d'années, la température moyenne sur la planète a rarement dépassé les –60 °C, et la Terre était presque intégralement recouverte d'une couche de glace dont l'épaisseur atteignait jusqu'à 1 kilomètre. L'eau liquide subsistait principalement sous la forme d'un océan situé sous la banquise. Ce scénario probable présente cependant une énigme: comment la vie, apparue environ 3 milliards d'années plus tôt, a-t-elle pu survivre à cette glaciation? Cet épisode était en effet très peu propice à une concentration de nutriments et de dioxygène dans les océans suffisante au maintien de la vie. Maxwell Lechte, de l'université McGill, au Canada, et ses collègues viennent de proposer une réponse, en analysant des roches qui suggèrent que les glaciers auraient joué localement un rôle dans l'oxygénation des océans.



Une Terre recouverte d'une épaisse couche de glace : c'est ce que propose l'hypothèse de la Terre boule de neige. Reste à expliquer comment la vie aurait perduré malgré ces conditions extrêmes.

Depuis que le géologue australien Douglas Mawson a proposé l'hypothèse de la Terre boule de neige dans les années 1950, les scientifiques tentent d'expliquer pourquoi la vie n'a pas été éradiquée par les conditions climatiques extrêmes de cette glaciation planétaire. En effet, à cette époque, la plupart des organismes complexes – des protozoaires unicellulaires et des algues pluricellulaires – avaient besoin de respirer, et donc de dioxygène, pour prospérer. Comment était-ce possible alors que l'eau liquide de l'océan était recouverte d'une couche de glace dont l'épaisseur la privait des échanges avec l'atmosphère qui assuraient son oxygénation?

Pour le comprendre, Maxwell Lechte et son équipe ont étudié des fragments rocheux datant de la glaciation marinoenne, et provenant de la ligne d'échouage de certains glaciers de l'époque – la frontière entre la zone où le glacier repose sur le socle rocheux continental et celle où sa glace commence à flotter sur l'eau. En analysant la composition chimique de ces roches, les géologues ont montré que certains métaux, tels le fer ou le manganèse, et une terre rare, le cérium, étaient surreprésentés sous des formes oxydées, ce qui témoigne d'un apport local important en dioxygène. En outre, plus les échantillons provenaient de zones éloignées de la ligne d'échouage, plus les formes oxydées y étaient rares. La ligne d'échouage était donc peut-être une véritable « oasis de dioxygène », avec des concentrations de ce gaz dans l'eau localement élevées, qui s'estompaient en une dizaine de kilomètres.

L'origine de ce dioxygène? D'après Maxwell Lechte, il proviendrait des nombreuses petites bulles d'air enfermées dans la neige compactée qui constituait les glaciers. Au niveau des lignes d'échouage, les bulles auraient été libérées dans l'océan liquide à la suite de la fusion de cette glace, due notamment aux frottements du glacier sur le socle rocheux rugueux. Ces oasis auraient-elles favorisé l'explosion des organismes complexes qui a suivi la glaciation? ■

700 mètres

C'EST L'ÉPAISSEUR, AU NIVEAU DE L'ÉQUATEUR, DE LA COUCHE DE GLACE QUI RECOUVRAIT LA TERRE DURANT LA GLACIATION MARINOENNE. AMINCIE PAR LA PUISSANCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE À CES LATITUDES, QUI SUBLIMAIT SA GLACE DIRECTEMENT EN VAPEUR D'EAU, ELLE RESTAIT CEPENDANT TRÈS ÉPAISSE.

L. G.

M. A. Lechte *et al.*, *PNAS*, vol. 116(51), pp. 25478-25483, 2019

© Shutterstock.com/Anton Balazh

PALÉOGÉNÉTIQUE

LA BOUCHE DE LOLA

Ils la nomment Lola. Hannes Schroeder, de l'université de Copenhague, et ses collègues viennent d'analyser, à partir d'un morceau de gomme de bouleau que cette jeune fille mâcha il y a quelque 5700 ans au Danemark, son génome et celui des microorganismes hébergés dans sa bouche. Le séquençage révèle que Lola avait les yeux bleus, la peau et les cheveux foncés et qu'elle était plus proche génétiquement des chasseurs-cueilleurs d'Europe de l'Ouest que de ceux du centre de la Scandinavie. Sa bouche contenait plusieurs ADN viraux et bactériens, dont celui du virus d'Epstein-Barr (agent de la mononucléose infectieuse) ; de l'ADN animal et végétal y témoigne d'un repas récent. La gomme de bouleau mâché est désormais une pièce à conviction archéologique de choix! ■

E. S.

T. Z. T. Jensen *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 5520, 2019

GÉNÉTIQUE

UN PRÉDICTEUR DE LONGÉVITÉ

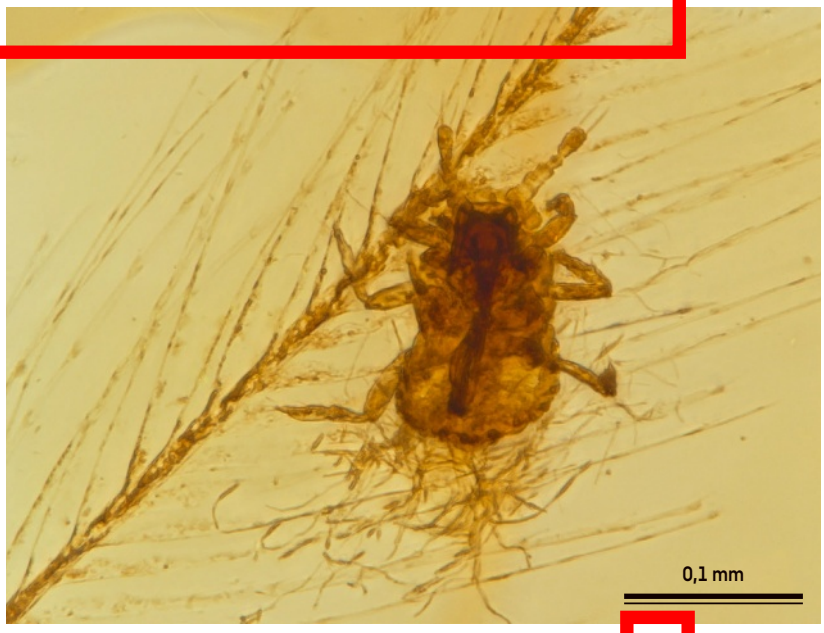
L'équipe australienne de Benjamin Mayne, du CSIRO, a conçu une méthode capable, à partir de matériel génétique d'estimer pour n'importe quelle espèce de vertébré sa longévité, c'est-à-dire l'âge maximal auquel un individu peut atteindre naturellement. Pour ce faire, elle a analysé des données issues de 252 génomes complets d'espèces de longévité connue. Elle a identifié un ensemble de 42 séquences d'ADN, communes et comparables entre les vertébrés, dont les variations reflètent celles de la longévité. De cette façon, les chercheurs estiment que les mammouths laineux pouvaient vivre jusqu'à 60 ans, encore que les baleines boréales peuvent vivre 268 ans. De façon surprenante, la longévité naturelle humaine serait d'environ 38 ans, environ 3 fois moins que celle observée. Une différence qui s'expliquerait par notre mode de vie très différent de celui des espèces sauvages, ainsi que par les progrès technologiques et médicaux. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

B. Mayne *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 9, article 17866, 2019

PALÉONTOLOGIE

DES POUX SUR LES DINOSAURES À PLUMES



L'un des poux découverts par l'équipe chinoise, accroché aux barbes d'une plume de dinosaure.

Taiping Gao et al.

Les ectoparasites sont des parasites vivant à la surface corporelle d'un organisme vivant. Nous craignons tous les siphonaptères (par exemple des puces qui transmettent la peste) et les phthiraptères (notamment des poux véhiculant le typhus) dont une lignée actuelle se nourrit de plumes d'oiseau. Or si l'on avait décrit des ectoparasites suceurs de sang datant du Jurassique (201 à 145 millions d'années) et du Crétacé (145 à 66 millions d'années), aucun fossile d'ectoparasite mangeur de téguments – c'est-à-dire de plumes, poils, peau, écailles… – n'avait jamais été signalé dans le Mésozoïque (252,2 à 66 millions d'années). C'est désormais chose faite: Taiping Gao, de l'université normale de la capitale, à Pékin, et ses collègues viennent de décrire des ectoparasites de dinosaures à plumes.

Dans deux blocs d'ambre birman datant du milieu du Crétacé (180 millions d'années), les chercheurs ont décelé, accrochés à des plumes de dinosaure manifestement grignotées, dix spécimens de deux tailles différentes d'une espèce d'insecte. Ils correspondent, selon eux, à deux stades larvaires successifs proches de la forme adulte. Ces insectes ont des thorax plats, de largeur représentant le tiers de la longueur du corps ; arrondie et massive, leur tête est munie de deux courtes antennes. Ces traits et d'autres distinguent ces minuscules insectes des poux actuels. Les chercheurs ont nommé cette espèce *Mesophthirus engeli*, c'est-à-dire « pou mésozoïque d'Engel », en l'honneur de l'entomologiste Michael Engel, de l'université du Kansas. Selon André Nel, du Muséum de Paris, *M. engeli* comptait probablement parmi les *Acercaria*, la lignée qui a donné les poux. ■

E. S.

T. Gao *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 5424, 2019



INFORMATIQUE-HISTOIRE

LA BELLE HISTOIRE DES RÉVOLUTIONS NUMÉRIQUES

Henri Lilen

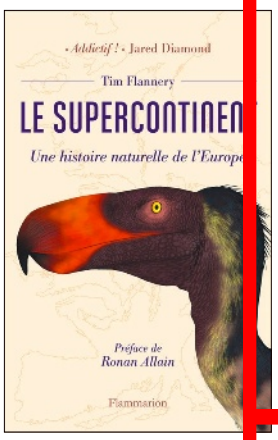
De Boeck, 2019
384 pages, 29 euros

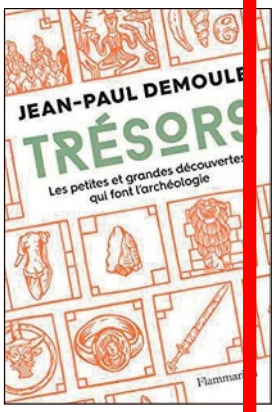
L'omniprésence du numérique dans nos sociétés est un phénomène dont on prend encore mal la mesure. Certes, nous sommes informés à un rythme quasi quotidien des dernières intrusions algorithmiques dans la médecine, la mobilité, la criminologie, la publicité, l'économie, la politique et quantité d'autres domaines, et nous sommes prévenus des bouleversements imminents, et souvent inquiétants, que provoqueront les recherches actuelles. Mais à ce mouvement effréné de nouveautés incessantes, il manque un certain sens de la perspective, une capacité de prendre du recul pour tout y retrouver.

C'est une telle prise de distance, passionnante et apaisée, que permet ce livre. Vétéran de l'électronique et de la micro-informatique, l'auteur retrace 116 ans d'évolutions, du tube diode de Fleming en 1904, au système européen de géolocalisation Galileo, opérationnel depuis peu. Un survol chronologique clair et richement illustré qui promène le lecteur du transistor au laser, des premiers codes informatiques à l'Internet, de la naissance de la disquette à l'ubérisation de la société, de la carte mémoire à la réalité augmentée, et qui permet de mieux saisir comment les innovations ont découlé les unes des autres, à mesure que la science n'a cessé de pénétrer dans nos moindres gestes quotidiens.

C'est la plus récente aventure humaine qui est ainsi rendue accessible aux curieux de tous âges qui se sont un jour demandé : « Comment en est-on arrivé là ? » Quant à la question de savoir où tout cela va nous mener, et s'il est encore temps d'y changer quelque chose, il faudra y consacrer une autre histoire. Espérons qu'elle sera belle elle aussi !

SEBASTIAN DIEGUEZ
UNIVERSITÉ DE FRIBOURG







GÉOLOGIE-CLIMATOLOGIE

LE SUPERCONTINENT

Tim Flannery

Flammarion, 2019
416 pages, 25 euros

Cette histoire de la nature européenne nous conduit du Crétacé supérieur, il y a quelque 70 millions d'années, quand l'Europe s'individualise sous la forme d'un archipel, jusqu'à la période actuelle et même jusqu'au futur, puisque l'auteur envisage le « réensauvagement » du continent, à grand renfort de lions et d'éléphants réintroduits et de mammouths ressuscités par le génie génétique. C'est à un long voyage dans le temps que nous invite donc l'auteur, qui assemble données scientifiques solides, hypothèses hardies, anecdotes historiques (parfois un peu approximatives) et expériences personnelles en un récit plein de rebondissements, qui se lit aisément et qui ménage pas mal de surprises.

Tim Flannery est un paléontologue australien, et cela lui confère un certain recul et une indéniable originalité dans sa façon de considérer l'histoire des plantes et des animaux de l'Europe. Les stars de la paléontologie que sont les dinosaures et les hominidés primitifs ont bien sûr leur place dans ce livre, mais pas de façon exagérée. Le lecteur découvrira, peut-être avec étonnement, une foule d'autres organismes moins connus et néanmoins surprenants, des crapauds accoucheurs aux oiseaux géants herbivores, des « poissons humains » slovènes aux hérissons géants italiens, pour ne citer que quelques unes des bizarreries apparues au fil du temps.

Au-delà des acteurs, qui sont des plantes et des animaux (y compris humains), l'évolution de la nature européenne, au rythme des déplacements continentaux, des variations du niveau des mers et de la valse des climats, est une épopée assez grandiose, racontée ici avec brio. Et c'est avec satisfaction qu'on notera que l'auteur, tout en restant très lucide face à certaines évolutions fâcheuses, ne cède pas au catastrophisme ambiant et envisage l'avenir des espaces naturels de l'Europe avec un certain optimisme.

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

ARCHÉOLOGIE

TRÉSORS

Jean-Paul Demoule
Flammarion, 2019
288 pages, 19,90 euros

Les lecteurs se plongeront avec plaisir et intérêt dans ce recueil des chroniques que Jean-Paul Demoule, professeur émérite des universités préhistorien et archéologue de renommée internationale, publie mensuellement dans la revue *Archeologia*.

Il y a fort à parier que l'on retournera souvent vers cet ouvrage tant l'érudit, l'étudiant et le chercheur y trouveront matière à penser et comprendre une discipline en pleine évolution. En effet, chaque chronique ici présentée sous forme d'un chapitre est rédigée de façon convaincante et franche, voire engagée: c'est là tout l'art de l'auteur. Il y aborde les grandes thématiques de l'archéologie contemporaine, analyse les pratiques disciplinaires anciennes et propose des pistes d'avenir.

Ce sont là les «trésors» rassemblés dans ce livre auxquels ils donnent le titre: de rares découvertes spectaculaires dues au hasard et dont, parfois, l'attrait pour les collectionneurs peut faire perdre la raison à des vendeurs, mais surtout des résultats scientifiques majeurs, et l'analyse de notions et de concepts pertinents.

Civilisation, peuple, culture, migration... mais aussi environnement, ADN, muséologie... ou encore Vix, Denisova, Nebra...: presque tout sur l'archéologie en France ainsi que sur des thématiques universelles des sciences humaines et sociales. La bibliographie qui clôt l'ouvrage n'est pas qu'un simple addendum; elle forme un outil original et actualisé. Dommage que des illustrations inutiles et inutilement titrées dans des polices faussement originales agacent ici et là.

DOMINIQUE GARCIA
PRÉSIDENT DE L'INRAP

BIOMÉDECINE

L'ABOMINABLE SECRET DU CANCER

Frédéric Thomas
Humensciences, 2019
320 pages, 22 euros

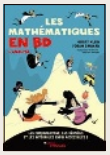
Le cancer, une maladie moderne? Non seulement l'épidémiologie nous convainc du contraire, mais de plus, nous serions passés à côté de sa véritable nature en nous concentrant sur les facteurs de risque actuels. Par sa démarche novatrice, Frédéric Thomas, du Centre de recherches écologiques et évolutives sur le cancer, nous entraîne dans une exploration scientifique à la fois dans le temps et dans l'espace, à la recherche des origines du cancer. Il appelle pour cela de multiples témoins à charge, depuis les dinosaures du Jurassique jusqu'aux diables de Tasmanie, en passant par les requins du Groenland ou les tortues vertes de Floride. Car le cancer est aussi vieux que l'émergence des organismes pluricellulaires, il y a environ 600 millions d'années!

Que s'est-il passé durant cette très longue période? L'auteur nous montre que le cancer est un processus écologique soumis à un continuum et aux mêmes règles que celles gouvernant tous les autres systèmes biologiques. Comme eux, il est régi par une organisation et des régulations communes. Comme eux, il fait partie intégrante des mécanismes de la vie et de notre écosystème intérieur. Habituellement en équilibre avec le reste de l'organisme, il est alors contenu et ne s'exprime pas. Si bien que nous sommes tous porteurs de formes plus ou moins latentes de cancer. Mais il peut parfois s'affranchir en échappant, pour différentes raisons, aux régulations normales.

En jouant ainsi «perso», le cancer vit alors sa propre vie au mépris du bien commun de l'organisme, qu'il finit par détruire. S'aidant de nombreuses métaphores qui rendent la lecture particulièrement agréable et accessible, l'auteur nous révèle ainsi des voies nouvelles de compréhension. Nous découvrons alors que l'abord évolutionniste de l'histoire du cancer suggère des moyens de guider sa trajectoire là où son impact sera minime sur notre santé.

BERNARD SCHMITT
CERNH, L'ORIENT

ET AUSSI


LA VOITURE QUI EN SAVAIT TROP
Jean-François Bonnefon
Humensciences, 2019
192 pages, 19 euros

«Les deux grandes promesses des voitures autonomes, comme on les appelle aussi, sont de polluer moins et d'avoir moins d'accidents. Éviter tous les accidents. Ce simple constat a des conséquences vertigineuses, parce que nous allons devoir choisir à quoi ressembleront les accidents qui ne pourront être évités. » Voilà ! Tout est dit par l'auteur lui-même sur l'objectif de son livre sur la morale des machines, dont nous ignorons ce qu'elle sera. Au moins une conclusion claire s'impose à la fin de la lecture, à savoir que « nous n'avons aucune idée de ce qui serait une répartition juste des accidents ».

LES MATHÉMATIQUES EN BD : L'ANALYSE
Grady Klein et Tolman Bachman
Eyrolles, 2019
224 pages, 20 euros

Les auteurs, un dessinateur et un économiste, ont déjà collaboré pour produire différents albums, dans lesquels ils simplifient par l'humour un sujet. Le dessin comme les explications sont assez sommaires, mais, de ce fait, rien n'arrête la lecture de cet album consacré au calcul infinitésimal. Structuré en trois parties – suites, dérivées, intégrales –, il amusera les adolescents déjà assez versés en mathématique, et les aidera à affermir des notions, qui découlent finalement d'un bon sens dont cette BD regorge.

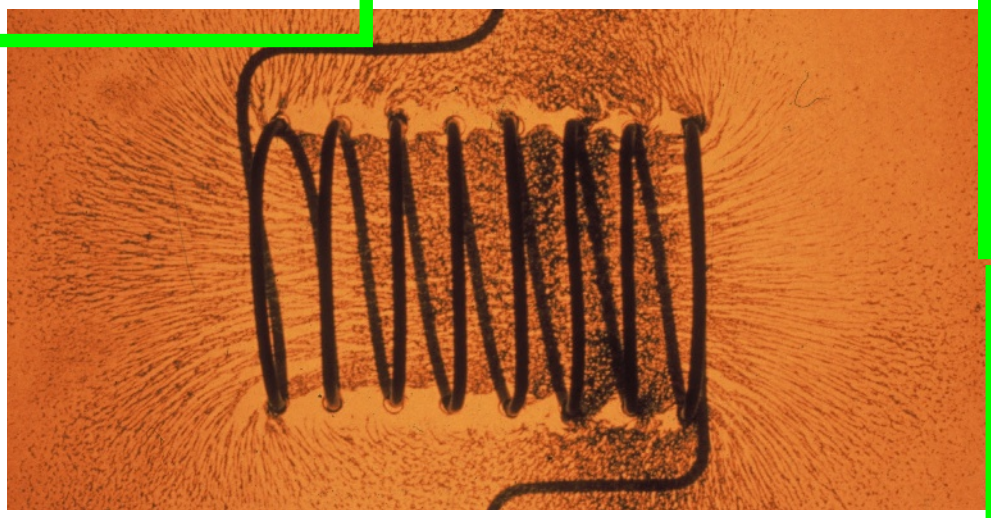
LA TERRE VUE DU CŒUR
Hubert Reeves
Seuil, 2019
1928 pages, 26,90 euros

Inspiré du film documentaire *La Terre vue du cœur*, ce livre rassemble certaines de ses images les plus magnifiques pour nous dévoiler notre planète. En adoptant un point de vue écologique décidément favorable aux générations futures, l'astrophysicien Hubert Reeves y met en évidence la dégradation considérable qu'elle subit par la faute de notre comportement. Dure constatation, mais un livre plein d'espoir et d'amour pour la seule planète que nous avons.

PARIS

JUSQU'AU 3 MAI 2020
Palais de la Découverte
www.palais-decouverte.fr

Magnétique

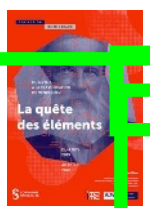


La fascination qu'exerce le magnétisme est [illegible] ce phénomène montre, à une échelle aisément accessible à nos sens, une force qui semble agir à distance, sans intermédiaire. Une force qui paraît donc mystérieuse, ce qui explique pourquoi divers charlatans se sont approprié le terme pour vendre leurs prétendus pouvoirs. Pour se familiariser avec le phénomène ou le démythifier, une visite de l'exposition du palais de la Découverte s'impose. Celle-ci propose une soixantaine d'expériences, réparties en cinq «îlots» thématiques. Elle vous fera comprendre l'origine du magnétisme, ses diverses formes, son lien avec les courants électriques, ses nombreuses applications (haut-parleurs, moteurs électriques, chargeurs sans fil, étiquettes RFID, etc.), les rôles qu'il joue dans un ordinateur. Et vous donnera un aperçu de certains travaux de laboratoire visant à créer des matériaux aux propriétés magnétiques nouvelles. ■

PARIS

JUSQU'AU 10 JUILLET 2020
Sorbonne Université - Collection des minéraux
Tél. 01 44 27 52 00

La quête des éléments

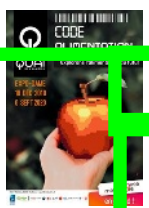


Une vingtaine de panneaux [illegible] de laboratoire, des minéraux, un spectaculaire tableau périodique des éléments : tels sont quelques-uns des ingrédients de cette exposition qui raconte la saga des éléments chimiques, des mythes de l'Antiquité jusqu'à nos jours avec la synthèse de nouveaux noyaux atomiques. ■

TOULOUSE

JUSQU'AU 6 SEPTEMBRE 2020
Quai des savoirs
www.quaidessavoirs.fr

Code Alimentation



Dans la peau d'un agent [illegible] effectuant une enquête alimentaire dans une ville du futur, le joueur-visiteur explore de façon ludique et interactive les divers aspects de l'alimentation (industrie, filières de transformation, modes de consommation et de distribution...) et ce que nous trouverons demain dans nos assiettes. ■

ET AUSSI

Mardi 4 février, 20 h 30
Espace des sciences, Rennes
espace-sciences.org
Tél. 02 23 40 66 00

LES TANNINS DES PLANTES

Marc-André Selosse, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, explique en quoi les tannins sont vitaux pour les plantes qui les produisent, et passe en revue un certain nombre des services qu'ils rendent à l'humanité.

Du 5 février au 2 mars 2020
Jardin des plantes, Paris
jardindesplantesdeparis.fr

MILLE & UNE ORCHIDÉES

Ce rendez-vous pour amateurs et spécialistes d'orchidées, où l'on peut admirer de multiples et étonnantes variétés, en est à sa huitième édition. Certaines espèces sont disponibles à la vente dans une boutique éphémère.

Mardi 11 février, 18 h 30
Chambéry (Haute-Savoie)
www.univ-smb.fr/arphis

LE SOUFFLE DES LACS

La plupart des lacs absorbent de l'oxygène et émettent du dioxyde de carbone, voire du méthane. Et ces émissions sont fortement influencées par l'environnement terrestre du lac. Une conférence de l'écologue alpin Étienne Dambrine, de l'Inrae.

Mercredi 12 février, 14 h
Cahors
https://[illegible].fr
Tél. 05 49 50 33 08

UN OCÉAN DE COMBATS

David Grémillet raconte la vie et l'œuvre de l'océanographe engagé Daniel Pauly.

Lundi 17 février, 19 [illegible]
Paris
www.bpi.fr

LA COLLABORATION CHEZ LES PLANTES

Dans le cadre d'une série de conférences sur l'« intelligence » des plantes, Bertrand Schatz, du CNRS à Montpellier, et Francis Martin, de l'Inrae à Nancy, parlent de la façon dont les plantes tirent parti de leurs semblables.

© Palais de la Découverte

GRENOBLE ET ENVIRONS

DU 11 AU 21 FÉVRIER 202

Lieux divers

www.experimenta.fr

Experimenta



Cette biennale d'arts et sciences, pilotée par le théâtre [illegible] est à sa 10e édition, fait se rencontrer artistes, scientifiques et technologues. La manifestation inclut douze spectacles, un salon et un forum. Le salon propose des installations (comme *Gallinero* de l'artiste espagnol Nestor Lizalde, où huit œufs conversent sans fin, sur la base d'algorithmes d'intelligence artificielle), des performances, des ateliers… Le forum est constitué de dix tables rondes sur divers sujets d'actualité, par exemple sur les liens entre art et intelligence artificielle ou sur les enjeux environnementaux de la création artistique. ■

ANNECY

JUSQU'AU 30 AOÛT 2020

La Turbine sciences

www.[illegible]es.fr



T'es sûr-e?

Cette exposition propose une vingtaine d'expériences simples et étonnantes essentiellement de physique, en suivant un même modèle: on fait d'abord un pronostic sur le résultat de l'expérience, puis on réalise celle-ci et, enfin, on cherche à comprendre ce qui est en jeu. L'objectif n'est pas de comprendre tous les phénomènes et lois physiques à l'œuvre dans ces expériences, mais de susciter la curiosité et donner l'envie d'aller plus loin. ■

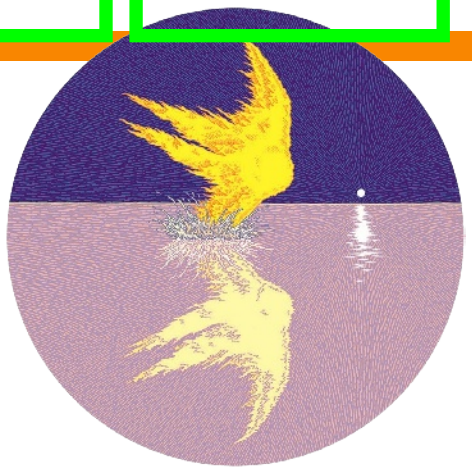
PARIS

JUSQU'AU 5 AVRIL 2020

La Reine Blanche

www.[illegible].com

Majorana 370



Disparu mystérieusement en 1938, Ettore Majorana, né en 1906 dans une riche famille sicilienne, était un jeune physicien théoricien de génie. Ses travaux imprègnent la physique d'aujourd'hui notamment à travers les «particules de Majorana», expression qui désigne des particules (de spin 1/2) identiques à leurs antiparticules: le concept est utile en physique du solide et les neutrinos sont peut-être (la question n'est pas tranchée) des particules de Majorana. L'énigme de ce personnage et de sa disparition est associée, dans cette pièce écrite par le dramaturge Florient Azoulay et la physicienne-comédienne-autrice Élisabeth Bouchaud, au destin de deux femmes de notre époque, dont l'une est physicienne du solide et l'autre est une architecte, qui prendra le funeste vol MH370 de la Malaysia Airlines. Une pièce entre imaginaire et réalité où il est question de physique, de quête de soi et d'autrui, de disparition, d'héritage. ■

En haut: © Nestor Lizalde; en bas: © La Reine Blanche

SORTIES DE TERRAIN

[illegible] 14 h

Étiolles (Essonne)

montauger.essonne.[illegible]

Tél. 01 60 91 97 34

ZONES HUMIDES

Trois heures de promenade commentée et consacrée à l'évolution d'un espace naturel sensible, le domaine des Coudrays, en bord de Seine.

Les jeudis du mois, 8 h 30

[illegible]

parc-naturel-brenne.fr Tél. 02 54 28 12 13

LES OISEAUX DU DOMAINE DU PLESSIS

À la découverte des étangs, de la faune et de la flore de cette belle propriété en plein cœur de la Brenne, appartenant à la Fédération départementale des chasseurs de l'Indre. Avec, à la fin, une dégustation de produits locaux.

Samedi 8 février, 10 h

[illegible]

www.cen-paca.org

Tél. 04 42 20 03 83

CRIQUETS D'HIVER

Cinq heures de randonnée pour recenser les espèces d'orthoptères encore actives à cette période.

Dimanche 16 février, 15 h

[illegible]

Verneuil-sur-Vienne (87)

www.lne-asso.fr

Tél. 05 55 48 07 88

MOLLUSQUES

La Société limousine d'étude des mollusques vous fera découvrir escargots, limaces et moules d'eau douce du Limousin, qui en abrite quelque 200 espèces.

Samedi 22 février, 14 h

[illegible]

www.cazilhac.org

Tél. 04 67 59 54 62

PLANTES URBAINES

Une après-midi pour faire connaissance avec la végétation sauvage des villes, et pour aider à en recenser les espèces.

Samedi 22 février, 9 h

[illegible]

www.[illegible].fr

Tél. 07 82 28 36 90

OISEAUX DE LA MARNE

Une journée d'exploration de la faune avienne dans plusieurs sites des boucles de la Marne, avec trajets en voiture d'un site à l'autre.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

ET L'ENTROPIE DEVINT INFORMATION

Le concept d'information préexistait à l'informatique : il était en germe, dès le XIXe siècle, dans la thermodynamique des physiciens.



L'étude des machines à vapeur a conduit au développement de concepts comme l'entropie, qui est une façon de décrire l'information contenue dans un système

L'informatique est souvent vue comme une branche des mathématiques qui se serait émancipée. Et il est vrai que les mathématiciens ont conçu des algorithmes et des langages, tel celui de l'algèbre, bien avant la naissance de l'informatique. Toutefois, ces deux concepts fondamentaux ne définissent pas l'informatique, qui en prend compte aussi deux autres : celui de machine et d'information. L'idée de machine est bien entendu issue de l'art des ingénieurs. De manière peut-être plus surprenante, la notion d'information semble issue de la physique.

Cette histoire commence en 1824, avec l'introduction par Sadi Carnot du deuxième principe de la thermodynamique, suivie, en 1865, de celle par Rudolf Clausius d'une grandeur nouvelle : l'entropie, qui mesure le désordre présent dans un système. Que nous dit ce principe ? Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation globale de l'entropie. Par exemple, lors de la détente isotherme d'un gaz parfait, où celui-ci fournit un travail en poussant un piston et reçoit de la chaleur de son environnement, l'entropie du gaz augmente de $Nk \ln V_2 - Nk \ln V_1$, où N est le nombre de molécules constituant ce gaz, V_1 son volume initial, V_2 son volume final et k une constante.

Pour comprendre pourquoi, il faut se souvenir que la force exercée par le gaz sur le piston est le produit de la pression du gaz $P=NkT/V$ par l'aire du piston a (T étant la température absolue). Le travail de cette force lors d'un déplacement dx du piston est le produit de cette force par ce déplacement. Enfin, la variation de l'entropie est le quotient de cette quantité de chaleur par la température : $Nk\,a\,dx/V$, c'est-à-dire $Nk\,dV/V$. En intégrant cette expression, l'entropie du gaz est donc, à une constante près, $S=Nk\ln V$.

> Un système demande d'autant plus d'information pour être décrit qu'il est désordonné

Mais l'entropie n'est pas la seule grandeur proportionnelle à $N\ln V$. Si nous imaginons que chaque molécule du gaz a un nombre fini de positions possibles et que ce nombre est proportionnel au volume du gaz (d'un facteur c), alors le nombre Ω de configurations possibles pour les N molécules est $(cV)^N$. Et le logarithme de ce nombre est, à une constante près, lui aussi égal à $N\ln V$. Ce résultat illustre une idée plus générale, formulée par Ludwig Boltzmann en 1877 : l'entropie d'un système physique à l'équilibre macroscopique, libre d'évoluer à l'échelle microscopique entre Ω configurations, est $S=k\ln\Omega$.

Au siècle suivant, en 1949, Claude Shannon, père de la théorie de l'information, a remarqué que le nombre de mots de n lettres, prises dans un alphabet qui en compte deux, par exemple A et B, est 2^n. Un mot de n lettres permet donc de décrire l'état d'un système qui peut se trouver dans 2^n états différents. Autrement dit, le nombre de lettres – la quantité d'information – nécessaires pour décrire un système caractérisé par Ω états possibles est $I=\ln\Omega/\ln 2$. Par exemple, trois lettres suffisent pour décrire un jour de la semaine, AAA décrivant le lundi, AAB le mardi, ..., BBA le dimanche.

L'histoire se conclut en 1956, quand Léon Brillouin en déduit que l'entropie d'un système est égale à $kI\ln 2$ et qu'elle se définit donc comme l'information nécessaire pour décrire sa configuration microscopique. Cela a ainsi donné un sens nouveau à l'idée de mesure du désordre, un système demandant d'autant plus d'information pour être décrit qu'il est désordonné. Par la suite, Rolf Landauer et Charles Bennett ont montré que l'effacement d'une unité d'information augmente l'entropie de $k\ln 2$ et dissipe donc une énergie $kT\ln 2$. La notion d'information existait donc en physique depuis le XIXe siècle ; mais personne ne s'en était aperçu, car elle portait un autre nom ! ■

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

© Shutterstock.com/Serjio74

cité

sciences
et industrie

CONFERENCES



© Philippe Rocher

journée mondiale des intelligences animales

1er février 2020

accès gratuit

L'animal & l'homme



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

QUE SONT NOS PEURS NOCTURNES DEVENUES ?

L'angoisse que la nuit suscite chez les humains s'est transformée au fil de l'évolution des sociétés et des techniques, mais elle n'a pas disparu



Craignons-nous l'obscurité de la nuit de la même façon qu'au Moyen Âge ? Cette question relève de l'histoire des représentations collectives de la vie nocturne et interroge les mécanismes qui nous conduisent à avoir confiance ou pas dans notre environnement.

Le rythme nycthéméral (ou alternance jour/nuit) n'est plus un territoire scientifique inconnu. Constituée en objet d'étude par les neurosciences et la physiologie, la nuit a été, sur ce plan, médiatisée dans les années 1980 avec les « sciences du sommeil ».

Les sciences sociales ne sont pas en reste avec le développement d'une anthropologie de la nuit, qui montre que les liens sociaux de la vie nocturne sont différents des liens sociaux de la vie diurne.

Par ailleurs, révélatrice des inégalités économiques, la nuit des métropoles constitue un domaine d'intervention des pouvoirs publics : elle oblige ceux-ci à concevoir des dispositifs institutionnels spécifiques de surveillance et de mobilité.

La vie nocturne est aussi liée à l'histoire des techniques d'éclairage. L'éclairage public a fait ses débuts à Londres au XV^e siècle. Les lanternes garnies de chandelles ont été ensuite remplacées par des réverbères à mèche et huile, puis, au XIX^e siècle, à gaz naturel, lequel a désormais cédé sa place à l'électricité.

> **Le mauvais sort a laissé place aux responsabilités humaines**

La durée de la nuit est naturellement plus ou moins longue selon la saison, mais elle tend aussi à diminuer en raison de la lumière des commerces qui colonise de plus en plus tardivement les espaces nocturnes. Le géographe Luc Gwiazdzinski, de l'université Grenoble-Alpes, a fait remarquer que dans les grandes métropoles, le temps de la nuit rétrécit à mesure que son esthétique se développe. Par ailleurs, afin d'optimiser le bilan énergétique des collectivités, celles-ci expérimentent des éclairages publics « intelligents », qui tiennent compte de l'affluence et du moment de la journée.

C'est pourquoi Michele Acuto, spécialiste des questions urbaines à l'université de Melbourne, a plaidé dans un récent article de l'hebdomadaire britannique *Nature* (numéro du 18 décembre 2019) pour une approche interdisciplinaire de la nuit. Il s'agit de rapprocher les sciences naturelles et sociales afin d'élaborer des stratégies intégrées sur les enjeux climatiques, migratoires et énergétiques.

La nuit étant devenue un objet de science et de conquête collective, ainsi qu'un enjeu transversal des politiques, notre rapport à elle et l'angoisse qu'elle suscite ont considérablement évolué.

Si la profondeur de la nuit médiévale suscitait des terreurs, la prière des moines veillait sur les populations endormies. Codifié par la religion, le rapport de l'homme à la vie nocturne était lié aux brigands, aux tavernes et aux fêtes. La disparition des croyances démoniaques n'a pourtant pas effacé notre angoisse face à la nuit. Les travaux du sociologue allemand Niklas Luhmann sur la confiance, publiés en 1968, nous en livrent l'explication.

Luhmann a montré que la complexification des sociétés modernes a augmenté d'une part les possibilités de décisions humaines, d'autre part l'imputation des événements à celles-ci plutôt qu'à la fatalité ou à des causes externes. Ainsi, le danger d'être mouillé en temps de pluie s'est transformé en risque depuis l'invention du parapluie : il revient à chacun de ne pas oublier d'emporter cet accessoire !

De même, avec la maîtrise vingt-quatre heures sur vingt-quatre de la luminosité dans l'espace public, le danger d'une agression nocturne est moins associé à une mauvaise rencontre qu'à la décision de se promener dans des lieux non éclairés. Les responsabilités humaines ont ainsi remplacé le mauvais sort. Les peurs irrationnelles n'ont cependant pas complètement disparu, et la nuit noire du solstice d'hiver n'a pas épuisé sa part de mystère... ■

VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation,

© Matyo

À LA CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

27 février

La banquise : le robot et le manchot
Yvon Le Maho, directeur de recherche à l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien, CNRS/université de Strasbourg et Centre scientifique de Monaco.

5 mars

La Lune : les robots et le nouveau continent
Bernard Foing, directeur groupe international lunaire ILEWG, Esa /Estec, responsable SMART-1, première mission lunaire européenne, professeur à VU, Amsterdam.

12 mars

Le désert : le robot inspiré d'une fourmi
Stéphane Viollet, directeur de recherche au CNRS, Institut des sciences du mouvement, Marseille.

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

des robots en milieux extrêmes

cycle de conférences

— les jeudis à 19h



cité sciences et industrie

© ESA - P.Carril



Palais DÉCOUVERTE

magnétisme : large champ de recherches

cycle de conférences

les samedis à 16h

AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

29 février

Champ magnétique, champ de Higgs… qu'est-ce qu'un champ ?
Gilles Cohen Tannoudji, physicien théoricien en physique des particules, conseiller scientifique, Larsim.

7 mars

Champs magnétiques : architectes de l'Univers ?
Patrick Hennebelle, chercheur au CEA, Saclay.

14 mars

Des bactéries qui ne perdent pas le nord
David Pignol, directeur de recherche à l'Institut biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille.

21 mars

Stockage des données : l'ère de la spintronique
Hélène Fischer, enseignante chercheuse à l'Institut Jean-Lamour, CNRS, université de Lorraine.

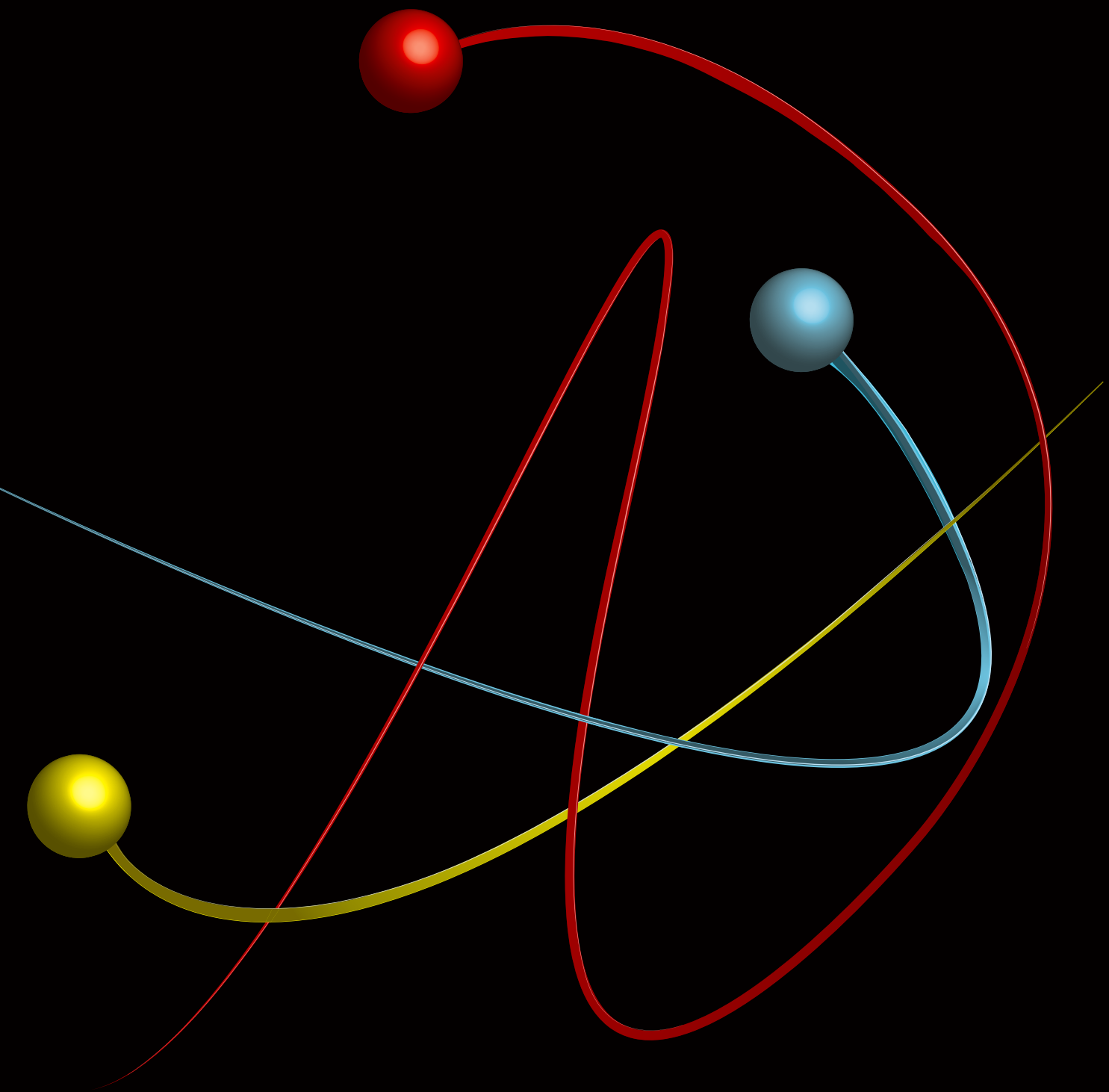
28 mars

Stocker plus, plus vite et plus sobre
Stéphane Mangin, enseignant chercheur à l'Institut Jean-Lamour, CNRS, université de Lorraine.

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

Accès gratuit dans la limite des places disponibles

Informations cite-sciences.fr et palais-decouverte.fr



L'ESSENTIEL

> Le « problème des trois corps » consiste à décrire la trajectoire de trois masses soumises seulement à leur attraction gravitationnelle mutuelle, leurs positions et vitesses initiales étant données.

> Au cours des deux derniers siècles, les mathématiciens ont montré que le problème des trois corps est quasiment « insoluble » : il est généralement impossible de décrire la trajectoire des corps par une formule.

> Le problème continue cependant d'inspirer les chercheurs, qui découvrent par exemple des solutions intéressantes dans des configurations particulières.

L'AUTEUR



RICHARD MONTGOMERY
professeur de mathématiques à l'université de Californie à Santa Cruz, aux États-Unis

Le problème des trois corps rebondit

Déterminer les trajectoires de trois corps soumis uniquement à leur interaction gravitationnelle est un problème célèbre posé depuis plus de deux siècles. Les mathématiciens savent aujourd'hui qu'ils ne pourront jamais le « résoudre » complètement. Cependant, l'étude de cas particuliers a, encore récemment, donné lieu à des découvertes intrigantes.

Au printemps 2014, j'avais baissé les bras face au problème des trois corps. À court d'idées, j'avais commencé à programmer sur mon ordinateur portable pour calculer des solutions approchées et les étudier. Ces tentatives ne répondraient jamais à la question mathématique précise que je m'étais posée, mais elles me fourniraient des indices pour avancer. Cependant, mon incompétence en programmation rendait cette expérience pénible pour un mathématicien comme moi, attaché à son papier et son crayon. J'ai alors fait appel à mon vieil ami Carles Simó, professeur à l'université de Barcelone, pour m'aider dans ma quête mathématique. Je ne me doutais pas qu'il m'ouvrirait un horizon totalement nouveau en mathématiques fondamentales.

Cet automne-là, je me suis donc rendu en Espagne pour rencontrer mon collègue, reconnu comme l'un des spécialistes les plus imaginatifs et rigoureux de l'analyse numérique en mécanique céleste. C'est aussi un homme direct qui ne tergiverse pas. Pendant mon premier après-midi dans son bureau, il m'a regardé de ses yeux perçants et m'a demandé : « Pourquoi cette question si abstraite t'intéresse-t-elle, au fond ? » Mon sang n'a fait qu'un tour. Cela faisait près de vingt ans que toute mon activité de recherche y était consacrée ! Si ma question me semblait importante, c'est parce qu'elle est liée à la fois à un problème vieux de plusieurs siècles et à deux domaines majeurs des mathématiques modernes : la topologie et la géométrie riemannienne.

Les origines du problème des trois corps remontent à 1687, lorsqu'Isaac Newton a, le premier, posé et résolu le problème des deux corps dans ses *Principia Mathematica*. Il s'était demandé : « Comment deux masses se déplaceront-elles dans l'espace si elles ne sont >

© Pour la Science

> soumises qu'à leur attraction gravitationnelle mutuelle ?» Newton a reformulé cette question en un problème de résolution d'un système d'équations différentielles, des équations qui déterminent le mouvement futur d'un objet à partir de sa position et de sa vitesse actuelles. Il a complètement résolu ces équations pour deux corps. Dans les solutions ou «orbites» (des trajectoires vérifiant ces équations différentielles), chaque objet décrit une conique – c'est-à-dire un cercle, une ellipse, une parabole ou une hyperbole.

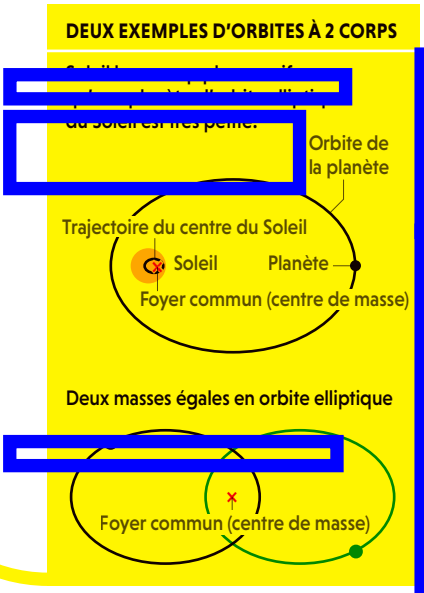
En identifiant toutes les orbites possibles, Newton a retrouvé et même affiné les «lois de Kepler», des lois empiriques régissant les mouvements des astres, publiées par l'astronome allemand Johannes Kepler en 1609, et qui synthétisaient des décennies d'observations astronomiques de son employeur, Tycho Brahe.

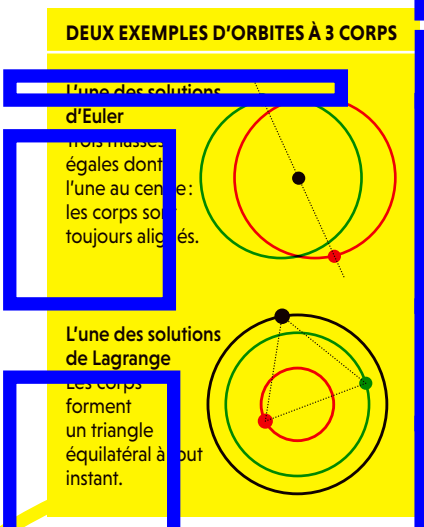
La première loi de Kepler, ou «loi des orbites», stipule que, dans le Système solaire, chaque planète – ou comète – se déplace selon une conique, dont l'un des foyers est le Soleil. Dans les solutions de Newton, cependant, les deux corps – le Soleil et une planète – se déplacent selon deux coniques distinctes. Ces deux coniques ont un foyer en commun : le centre de masse des deux objets. Le Soleil étant bien plus massif que les planètes du Système solaire, le centre de masse d'un système Soleil-planète est contenu dans l'étoile, très près de son centre de masse à elle, et cette dernière oscille à peine autour du centre de masse commun, suivant une petite ellipse.

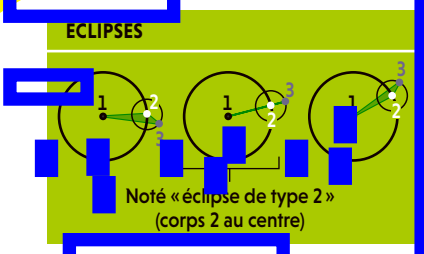
Si l'on considère trois masses interagissant par la force de gravitation newtonienne au lieu de deux, le problème devient celui des trois corps. Là encore, les orbites sont les solutions d'un système d'équations différentielles. En revanche, il est difficile, voire impossible, d'exhiber des formules explicites pour ces orbites. À ce jour, malgré l'aide des ordinateurs modernes et plusieurs siècles de travail acharné de physiciens et mathématiciens parmi les plus talentueux, on n'a de formules explicites que pour cinq familles d'orbites : trois découvertes par le mathématicien suisse Leonhard Euler en 1767, et deux par son confrère français (d'origine italienne) Joseph-Louis Lagrange en 1772.

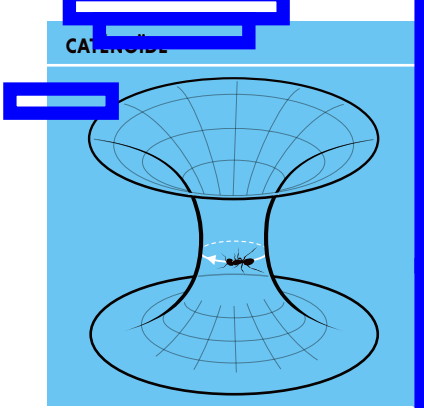
Et pour cause : en 1890, le mathématicien et physicien français Henri Poincaré a mis en évidence des phénomènes chaotiques dans le problème des trois corps. Les solutions des équations du mouvement sont si sensibles aux conditions initiales qu'on ne les connaîtra jamais toutes exactement, ou même seulement avec un degré de précision donné ; on est donc très loin de la solution simple, unique et exacte de Newton pour le problème des deux corps.

Cependant, par «intégration numérique», un ensemble de techniques d'analyse numérique implémentées avec efficacité sur un ordinateur, on peut tout de même calculer de façon approchée des portions de trajectoire de durée finie, ce qui est d'ailleurs essentiel dans la planification des missions spatiales. En allongeant le temps de calcul alloué à l'ordinateur, il est possible de rendre ces approximations aussi fidèles que voulu, sous réserve de connaître parfaitement les conditions initiales.









UNE QUESTION SUR LES SUITES D'ÉCLIPSES

C'était donc pour obtenir de l'aide dans ce domaine prometteur que je consultais mon collègue Carles Simó. Sa question m'avait interloqué. Je travaillais en effet depuis plusieurs décennies sur un point bien précis en lien avec le problème des trois corps :

«Toute suite d'éclipses périodique est-elle la suite associée à une certaine solution périodique du problème des trois corps planaire ?»

Je m'explique. Imaginez trois corps – des étoiles ou des planètes, par exemple – se déplaçant dans un même plan et exerçant les uns sur les autres une attraction gravitationnelle. Par la suite, on se placera toujours dans ce cas particulier, dit «planaire». Numérotez les objets 1, 2 et 3. Leurs masses sont pour l'instant quelconques. Comme les trois objets se déplacent dans un même plan, ils seront de temps en temps alignés. Ces instants ne sont rien d'autre que des éclipses (techniquement, ils sont nommés «syzygies», un mot idéal pour gagner au jeu du pendu). À mesure que le temps s'écoule, enregistrez chaque éclipse qui se produit, en lui donnant le numéro 1, 2 ou 3 selon le numéro de l'astre qui se trouve entre les deux autres. De cette façon, on obtient une suite de 1, 2 et 3, la «suite d'éclipses».

Par exemple, dans une version simplifiée de notre système Soleil-Terre-Lune, la Lune, numérotée 3, tourne autour de la Terre (corps numéroté 2) en un mois (considéré ici comme valant un douzième d'année) tandis que la Terre met un an à faire une révolution autour du Soleil, numéroté 1. Ce mouvement se répète, et

© Illustrations de Nigel Hawtin

donne donc lieu à une suite d'éclipses périodique : 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3. Cette suite ne contient pas de 1, puisque le Soleil ne se trouve jamais entre la Terre et la Lune. Pour une durée de un an, la suite contient donc 24 nombres, avec un groupe « 2, 3 » pour chacun des 12 mois de l'année.

Dans le cas général, puisqu'il s'agit de systèmes chaotiques, il n'y a aucune raison pour que la suite d'éclipses d'une solution du problème des trois corps soit périodique : elle peut très bien se dérouler éternellement sans exhiber de motif discernable. Cependant, si la solution se répète à l'identique après un certain intervalle de temps, comme dans le système Soleil-Terre-Lune simplifié, alors la suite d'éclipses sera aussi périodique. D'où la question que je m'étais posée : toute suite d'éclipses périodique est-elle la suite associée à une certaine solution périodique du problème des trois corps planaire ? Je soupçonnais que la réponse est « oui », mais je n'arrivais pas à le prouver.

DES OBJETS AVEC DES TROUS

Carles Simó, pour sa part, était davantage versé dans l'aspect pratique du calcul numérique d'orbites pour les missions spatiales que dans des questions abstraites à propos de suites d'éclipses ; il n'avait donc pas vu l'intérêt de ma question. Pourtant, j'avais l'intuition que, pour y répondre, je pourrais utiliser une approche qu'il connaissait bien, associant trois domaines des mathématiques : la topologie (domaine où l'on étudie les propriétés d'objets que l'on a le droit de déformer, mais pas de déchirer ou trouer), la géométrie riemannienne (qui étudie entre autres les surfaces courbes), et les systèmes dynamiques, relatifs à l'évolution temporelle des systèmes et aux mouvements des objets.

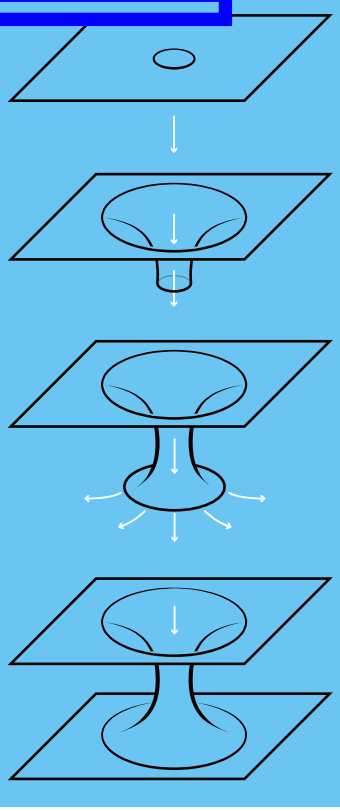
Pourquoi cette intuition ? Parce que ces domaines étaient déjà reliés par d'autres résultats bien connus, dont certains présentent des similarités avec le problème des trois corps. Imaginez une fourmi qui marche sur la surface que les mathématiciens nomment « caténoïde ». L'objectif de la fourmi est de trouver le chemin le plus court pour tourner une fois autour du trou. Du point de vue de la topologie, la caténoïde est identique à un plan (avec deux coordonnées réelles, x et y) « épointé », c'est-à-dire auquel on a retiré un seul point. En effet, retirez un point d'une feuille souple et déformable en caoutchouc. En poussant le bord du trou vers le bas et en l'étirant vers l'extérieur, vous déformerez le plan en une caténoïde. Il a été démontré que, si le trou a été suffisamment élargi, non seulement il existe un chemin de longueur minimale, mais celui-ci satisfait une équation différentielle très similaire à celle du problème des trois corps. Ainsi, notre fourmi a trouvé une solution périodique à une équation différentielle intéressante.

Dans le problème des trois corps, le rôle de la caténoïde est assumé par ce qu'on nomme l'« espace de configuration », un espace dont chaque point encode simultanément la position des trois astres, de sorte qu'une courbe dans l'espace de configuration décrit le mouvement des trois corps. Veiller à ce que les corps n'entrent pas en collision revient ici à faire des trous – retirer des points – dans cet espace de configuration. Comme on le verra, d'un point de vue topologique, l'« espace de configuration sans collision » qui en résulte est identique au plan x-y auquel on a retiré deux points. On note « 12 » le trou représentant la collision des corps 1 et 2, et « 23 » celui représentant la collision des corps 2 et 3, et on place ces trous sur l'axe des abscisses (l'axe des x). On place aussi un troisième trou « à l'infini » (un point abstrait, situé infiniment loin de l'origine dans toutes les directions) pour représenter la collision des corps 1 et 3.

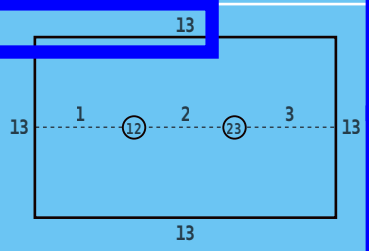
Ces trous divisent l'axe des abscisses en trois morceaux, notés 1, 2 et 3 (ces choix sont arbitraires et les rôles des corps 1, 2 et 3 peuvent bien sûr être intervertis). Une courbe dans ce plan x-y doublement épointé représente une trajectoire sans collision des trois corps, et donc une solution potentielle du problème des trois corps ; potentielle seulement, car rien ne garantit pour l'instant que cette trajectoire satisfasse aux lois de la mécanique newtonienne. Quand la courbe coupe l'intervalle 1, cela signifie qu'une éclipse de type 1 se produit (le corps 1 est entre les deux autres), et de même pour les intervalles 2 et 3. De cette façon, une suite d'éclipses représente une manière d'enrouler la courbe autour des trous représentant les collisions.

Notre fourmi voulait minimiser la longueur de son chemin autour du trou sur la caténoïde. Pour compléter l'analogie entre le problème de la fourmi et le problème des trois corps, il faut remplacer la grandeur « longueur du chemin » par une quantité nommée « action » du chemin. On peut définir l'action comme >

DÉFORMATIONS EN TOPOLOGIE



ESPACE DE CONFIGURATION SANS COLLISION



> une sorte de moyenne temporelle de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système, lorsqu'il suit une trajectoire donnée. Mais ce qui nous intéresse ici est d'utiliser cette grandeur pour identifier les trajectoires physiquement acceptables.

Un théorème de mécanique plus que centenaire, le « principe de moindre action », implique en effet que toute courbe dans notre espace de configuration pour laquelle la valeur de l'action est minimale représente une solution au problème des trois corps de Newton. Une piste pour résoudre mon problème d'éclipses consistait donc à rechercher, parmi tous les chemins fermés et sans collision donnant une suite d'éclipses donnée, lesquels avaient une action minimale.

Pendant dix-sept ans, je m'étais intéressé de près à cette stratégie – chercher à minimiser l'action de boucles ayant une suite d'éclipses donnée dans un espace de configuration –, stratégie qui avait offert de jolis résultats. Par exemple, en 2000, Alain Chenciner, de l'université Paris-Diderot, et moi-même avions redécouvert de cette manière ce qui semble être la première solution périodique connue du problème des trois corps avec un moment cinétique nul (le moment cinétique est une mesure de la quantité totale de « rotation » d'un système massif ; elle est constante dans le temps pour une orbite donnée ; les solutions d'Euler et de Lagrange correspondent toutes à un moment cinétique non nul).

Notre solution était une orbite en forme de 8, découverte originellement en 1993 par Cris Moore, de l'Institut de Santa Fe. Dans cette configuration, trois astres de même masse se déplacent le long d'un 8, dans un plan. La suite d'éclipses associée est 123123…, la séquence 123 se répétant à l'infini. Notre travail a popularisé la figure en 8 et fourni une preuve rigoureuse de l'existence de cette solution. Il a aussi entraîné la découverte successive, tout au long des années 2000, de nombreuses solutions nouvelles du problème de *N* corps de masses égales, des orbites nommées « chorégraphies » par Carles Simó, lequel a lui-même découvert des centaines de familles de ce type. L'orbite en forme de 8 apparaît même dans un fameux roman de science-fiction de Liu Cixin, publié en 2008, dont le titre a été traduit en *Le Problème à trois corps*.

Le lendemain matin du jour où j'avais fait part de mes réflexions à Carles Simó, il m'a dit quelque chose qui m'a profondément marqué : « Richard, j'ai réfléchi à ton problème. Si ce que tu conjectures à propos de ta question est vrai, alors il doit y avoir un mécanisme dynamique sous-jacent. » En d'autres termes, si j'avais raison de penser que la réponse à ma question était « oui », alors cela devait s'expliquer de manière concrète par la façon dont les corps se meuvent, et le mode de recherche plus abstrait que j'avais adopté en travaillant sur l'action n'était pas la démarche adaptée.

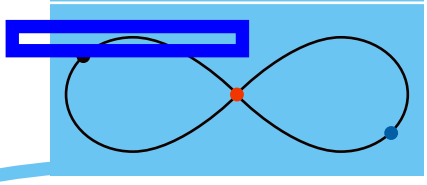
Ces quelques mots m'ont fait douter de mes convictions et m'ont poussé à mettre un terme à dix-sept ans de tentatives de répondre à ma question en minimisant l'action. Quels mécanismes dynamiques comprenais-je vraiment dans ce problème ? J'en ai compté deux, dont un seulement me donnait l'espoir d'avancer. Ce mécanisme est lié au chaos découvert par Poincaré et dû à l'extrême sensibilité des solutions aux conditions initiales. Il est relatif au comportement complexe des solutions lorsqu'elles s'approchent – sans l'atteindre – d'une « collision triple » (une collision simultanée des trois corps) dans le problème des trois corps. Cela m'a amené à réfléchir sur d'anciens travaux d'un de mes collègues récents, Rick Moeckel, de l'université du Minnesota.

Dans les années 1980, ce chercheur avait exploré ce mécanisme et montré que l'étude du comportement des solutions au voisinage des collisions triples donnait des résultats intéressants. En relisant ses vieux articles, il m'est apparu que Rick Moeckel avait peut-être la clé de mon problème. J'ai pris contact avec lui et, en quelques jours, nous avons répondu à ma question ! Enfin, presque. Nous avions répondu à une question infiniment proche.

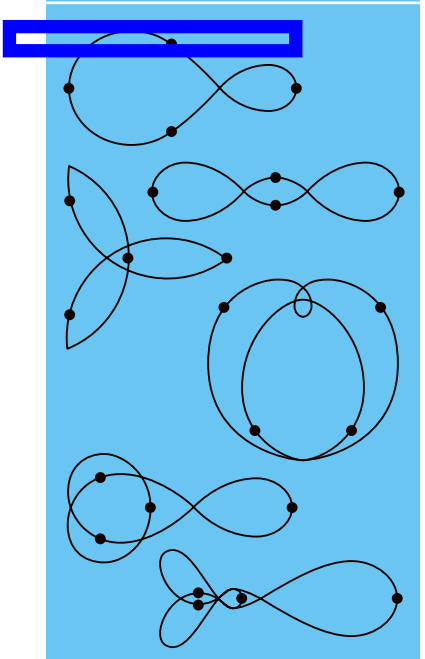
LA « SPHÈRE DES FORMES », UN CONDENSÉ DES MOUVEMENTS POSSIBLES

Pour comprendre le mécanisme dynamique que Rick Moeckel avait étudié et pourquoi l'espace de configuration du problème des trois corps équivalait au plan *x*-*y* doublement épointé, comme je l'ai dit plus haut, il est nécessaire d'introduire un objet mathématique nommé la « sphère des formes ». Lorsque les trois corps sont en mouvement dans un plan, ils forment à chaque instant les sommets d'un triangle. Au lieu d'enregistrer la position de chacun des sommets, nous gardons trace, au fil du temps, que de la

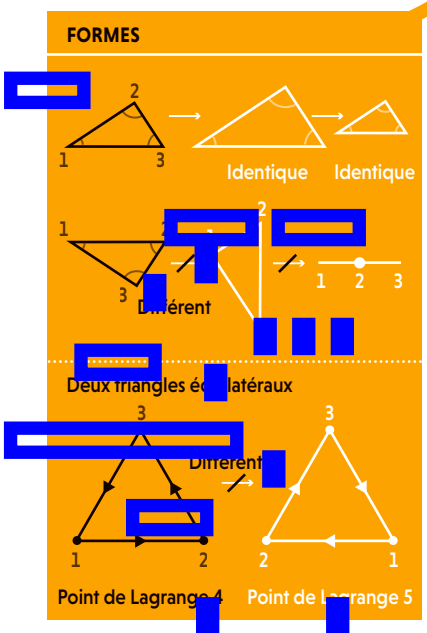
SOLUTION EN FORME DE 8



NOUVELLES ORBITES (À 4 CORPS)



FORMES



forme globale du triangle qu'ils dessinent. On obtient une courbe sur la sphère des formes, une sphère où chaque point représente une « forme » de triangle.

Qu'est-ce qu'une « forme » ? Deux figures dans le plan ont la même forme si l'on peut passer de l'une à l'autre par translation, rotation ou dilatation. L'opération consistant à passer d'une configuration possible du problème des trois corps – c'est-à-dire la connaissance de la position des trois sommets du triangle – à un point de la sphère des formes est un processus qui « oublie » la taille du triangle, la position de son centre de gravité et l'orientation du triangle dans le plan.

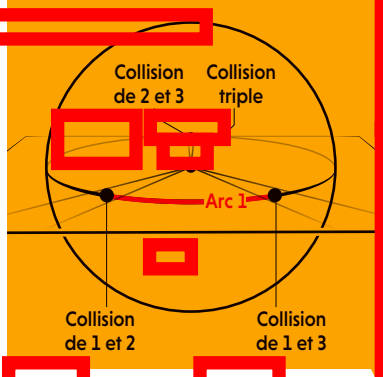
Il est facile de comprendre pourquoi l'espace décrivant les formes est de dimension 2 grâce à des faits géométriques élémentaires. La forme d'un triangle, définie comme ci-dessus, est entièrement déterminée par la connaissance de ses trois angles ; mais, comme la somme des mesures des trois angles fait toujours 180 degrés, on n'a en fait besoin que des deux premiers angles parmi les trois. Deux nombres suffisent donc pour caractériser la forme d'un triangle. Le fait que cet espace des formes soit une sphère est plus difficile à comprendre, et nous ne le justifierons pas ici.

Comment décrit-on l'ensemble des formes de triangles sur une telle sphère ? Cela requiert que l'on permette aux triangles d'être « dégénérés », c'est-à-dire d'avoir leurs trois « sommets » alignés. En prenant en compte tous les rapports de distances possibles entre les trois « sommets », on dessine exactement l'équateur de la sphère des formes. Ces triangles dégénérés, qui sont d'aire nulle, représentent les éclipses. Parmi eux figurent notamment les collisions de deux corps ou « collisions binaires » : en effet, un triangle dont deux sommets sont confondus est automatiquement dégénéré. La sphère des formes compte ainsi exactement trois triangles de collision binaire, notés 12, 13 et 23 selon les sommets confondus.

On retrouve les triangles non dégénérés sur le reste de la sphère des formes, en dehors de l'équateur. Chacun de ces triangles correspond à un point de la sphère, à une certaine distance de l'équateur le long de la sphère. Cette distance est elle-même donnée par le rapport A/r^2 où A est l'aire du triangle et r sa taille (ce rapport est donc une aire normalisée de façon que des triangles de tailles différentes soient comparables). Ici, la « taille » d'un triangle est une mesure géométrique unidimensionnelle de sa grandeur, contrairement à l'aire. Ainsi, aucun des triangles représentés par la sphère des formes n'est de taille nulle, car aucun n'est réduit à un point. Les pôles nord et sud de la sphère, situés à distance maximale de l'équateur, représentent donc les triangles d'aire maximale (pour une taille donnée) et sont par conséquent équilatéraux.

Mais pourquoi y en a-t-il deux ? Parce que l'ordre de leurs sommets diffère. Il n'y a aucun moyen de passer de l'un de ces triangles équilatéraux à l'autre par translation, rotation et dilatation : ils représentent véritablement des formes différentes. En revanche, une réflexion (une symétrie miroir par rapport à n'importe quel plan dans l'espace) fait passer d'un triangle à l'autre. Cette opération de réflexion agit sur tous les triangles – et donc sur les points de la sphère des formes – par symétrie par rapport à l'équateur, en laissant fixes les points de l'équateur (qui représentent les triangles dégénérés) et en échangeant les hémisphères nord et sud.

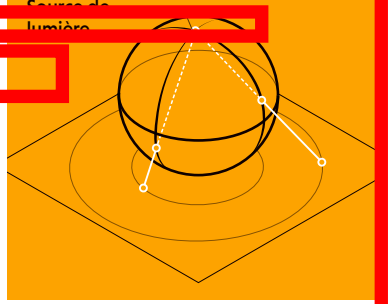
LA SPHÈRE DES FORMES (1)



Pendant dix-sept ans, j'ai cherché à minimiser l'« action » de boucles à suite d'éclipses donnée

Je peux maintenant vous expliquer comment la sphère des formes montre que l'ensemble des configurations du problème des trois corps est bien topologiquement identique au plan x-y doublement épointé. Pour cela, il nous faut montrer qu'une sphère privée d'un point est assimilable au plan x-y classique. Une manière de le comprendre est d'utiliser la projection stéréographique, qui projette une sphère privée d'un seul point (qui fait office de « source de lumière ») sur le plan x-y usuel. Chaque point de la sphère épointée est projeté sur le plan x-y par la droite qui relie ce point à la source de lumière. Si l'on considère des points de la sphère de plus en plus proches de la source de lumière, leur point image par la projection stéréographique sur le plan s'échappe à l'infini ; on >

PROJECTION STÉRÉOGRAPHIQUE

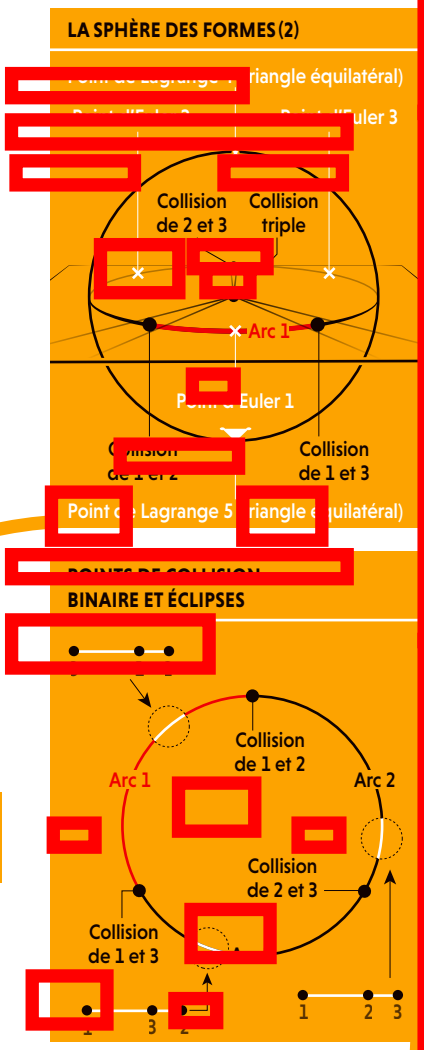


> peut donc aussi dire que le plan *x*-*y* auquel on a ajouté un point à l'infini est topologiquement identique à une sphère (source de lumière incluse).

Une question se pose cependant : quel point choisir comme source de lumière ? Une possibilité assez naturelle est de choisir le pôle nord, mais il y a plus judicieux pour notre problème : si l'on prend plutôt comme source de lumière le point de collision 13, en faisant basculer toute la sphère pour que ce point soit au « sommet » de la sphère – à l'emplacement originel de son pôle nord –, le point à l'infini du plan *x*-*y* correspond maintenant, par la projection stéréographique, à ce point 13. Et si l'on oriente de plus la sphère pour que son plan équatorial contienne l'axe des *x* du plan *x*-*y*, la projection stéréographique met en correspondance l'équateur de la sphère, contenant les triangles dégénérés, et l'axe des *x* du plan ; de plus, les deux autres points de collision (12 et 23) sont envoyés sur deux points distincts sur l'axe des *x*. Il ne reste plus qu'à retirer les deux points de collision sur la sphère en même temps que leur image dans le plan, et l'on obtient l'équivalence recherchée entre l'ensemble des configurations du problème des trois corps et le plan *x*-*y* doublement épointé.

Les points de collision binaire sont trois points spéciaux sur la sphère des formes. En dehors de ces trois points, il existe cinq autres points spéciaux sur la sphère des formes, nommés « configurations centrales ». Ces cinq configurations centrales correspondent aux cinq familles de solutions découvertes par Euler et Lagrange, qui sont d'ailleurs les seules solutions pour lesquelles la forme du triangle est constante. Dans les solutions de Lagrange, le triangle est équilatéral à tout instant. Comme on l'a vu, elles sont au nombre de deux ; elles constituent les pôles nord et sud de la sphère des formes et on les nomme « point de Lagrange 4 » et « point de Lagrange 5 ».

Les trois autres configurations spéciales sont les « configurations d'Euler », nommées « point d'Euler 1 », « point d'Euler 2 » et « point d'Euler 3 ». Ce sont des configurations dégénérées où les trois masses sont alignées ; elles sont donc situées sur l'équateur de la sphère des formes. Plus précisément, elles sont disposées entre les trois points de collision ; leur distance aux points de collision sur l'équateur dépend d'ailleurs des rapports de masse entre les trois corps. Le point d'Euler 1, par exemple, est situé sur l'arc de l'équateur noté 1, comme toute configuration dans laquelle le corps 1 est situé entre les corps 2 et 3. (Souvent, les cinq configurations centrales sont toutes nommées points de Lagrange, celles d'Euler étant notées « L1 », « L2 » et « L3 ». Dans la suite, nous noterons ces cinq configurations « E1 », « E2 », « E3 », « L4 » et « L5 ».)



Une autre manière de comprendre les cinq configurations centrales est d'imaginer ce qui se passe lorsqu'on dispose les trois corps dans l'espace, sans vitesse initiale, et qu'on laisse évoluer le système à partir de ces conditions. Dans le cas général, toutes sortes de choses se produisent alors : des collisions binaires, des ballets déchaînés, et, parfois, un corps qui s'échappe à l'infini. Mais lorsqu'on dispose les corps selon l'une des configurations centrales, le triangle qu'ils déterminent garde la même forme à tout instant et rétrécit simplement jusqu'à se réduire à un point, les corps s'attirant les uns les autres jusqu'à ce que la solution se termine en une collision simultanée des trois corps – une collision triple.

Ces cinq configurations centrales correspondent donc à des positionnements des trois corps tels que, si ces derniers sont lâchés sans vitesse, ils entrent en collision triple sans déformation du triangle qu'ils forment. Cependant, s'ils ont des vitesses initiales non nulles bien choisies, on retrouve les orbites décrites par Euler ou Lagrange (d'où le nom des configurations centrales sur la sphère des formes). Avec des vitesses quelconques en revanche, le comportement du système est chaotique et donne toutes sortes de trajectoires, bien que les positions de départ aient formé un triangle équilatéral.

LES CINQ CHEMINS VERS LA COLLISION TRIPLE

La collision triple est une singularité essentielle du problème des trois corps, tel un « Big Bang » au cœur du problème. Elle est à l'origine d'une grande partie du chaos qu'il contient et de la difficulté à le résoudre. Au début du XX^e^ siècle, le mathématicien finnois Karl Sundman a démontré que les cinq configurations centrales où les trois corps sont initialement immobiles sont les seuls chemins vers la collision triple. Cela signifie plus généralement que toute solution qui finit en collision triple doit s'approcher de cette collision d'une manière similaire à l'une des configurations centrales : la forme du triangle de la solution doit s'approcher infiniment près de

la forme du triangle de cette configuration centrale. Les configurations centrales sont donc en quelque sorte «universelles», en ce sens qu'elles correspondent aux cinq seules formes possibles d'une solution s'approchant d'une collision triple.

Le travail de Sundman était une prouesse faisant dialoguer de manière complexe l'algèbre et l'analyse. Plus tard, l'année où j'ai terminé mon lycée (je n'avais alors jamais entendu parler du problème des trois corps), le mathématicien américain Richard McGehee a inventé une méthode dite «de l'éclatement», qui permettait de mieux comprendre visuellement le travail de Sundman et d'étudier en détail la dynamique du système près de la collision triple.

La taille du triangle, r, représente aussi la distance d'une configuration à la collision triple. Lorsque r tend vers zéro et que l'on se rapproche de la collision triple, le comportement des équations newtoniennes du mouvement devient pathologique, avec des termes qui tendent vers l'infini. Richard McGehee a trouvé un changement de variables, impliquant l'espace de configuration et la variable de temps, qui diminue la vitesse d'approche vers la collision triple et remplace le point de collision triple, correspondant à $r=0$, par un nouvel ensemble de points, nommé la «variété de collision». Surprise: la variété de collision est essentiellement une copie de la sphère des formes! La méthode de Richard McGehee permet en substance d'étendre les équations du mouvement, au départ valides seulement pour $r>0$, en un système d'équations différentielles qui garde son sens lorsque $r=0$.

Les équations du mouvement n'ont pas de point d'équilibre, ce qui signifie qu'il n'y a pas de configuration dans laquelle les trois corps restent au repos: trois étoiles dans l'espace, qui s'attirent les unes les autres, ne peuvent pas juste rester là où elles sont sans bouger. Mais lorsqu'on étend les équations du mouvement à la variété de collision, des points d'équilibre apparaissent. Il y en a exactement dix: deux pour chacune des cinq configurations centrales de la sphère des formes. L'un des deux éléments de chaque paire représente l'état final d'une configuration centrale «lâchée» avec une vitesse initiale nulle et qui se termine en collision triple.

Pour comprendre ce que représente l'autre élément, il faut imaginer que l'on regarde le film de cette collision triple à l'envers. Comme les équations newtoniennes du mouvement sont les mêmes lorsque le temps s'écoule à l'envers – on dit qu'elles sont «réversibles» –, il est possible de faire se dérouler une solution en remontant le temps. On obtient ainsi une autre solution. Lorsque l'on renverse de cette façon le déroulement d'une configuration centrale «lâchée» avec une vitesse initiale nulle, qui «implose» en une collision triple, on obtient une solution qui «explose» en partant de cette collision triple, atteignant une taille maximale qui n'est autre que la configuration centrale considérée, l'état initial du «lâcher». L'autre élément de la paire représente donc la configuration initiale de cette solution «explosive» – on parle d'«éjection» –, à l'instant (inexistant dans la réalité physique) où les trois corps sont encore «collés» en un même point.

Ensemble, ces deux solutions liées à une configuration centrale – éjection et collision – se recollent bien et forment une solution d'éjection-collision unique qui quitte le point d'équilibre $r=0$ pour entrer dans le domaine où $r>0$, où elle atteint sa taille maximale, avant de rapetisser sous l'effet de la gravité pour revenir au point de collision triple correspondant dans la variété de collision. Cette solution complète relie l'un à l'autre les deux éléments d'une paire.

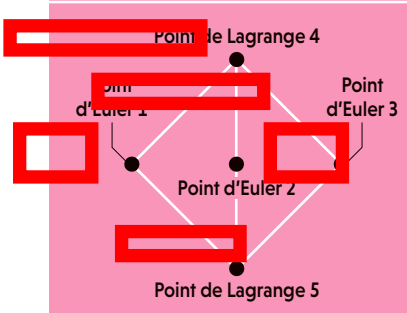
En créant ces points d'équilibre associés aux configurations centrales, au cœur du problème des trois corps, Richard McGehee a donné à Rick Moeckel les clés pour appliquer avantageusement des résultats récents sur les systèmes dynamiques – des résultats inconnus de Newton, Lagrange ou Sundman – au problème des trois corps. Et c'était cette approche dynamique qui m'était revenue à l'esprit après les paroles de Carles Simó et qui m'avait conduit à contacter Rick Moeckel.

LE CHEMIN DE MOECKEL

En effet, en explorant les articles que Rick Moeckel avait publiés sur le sujet dans les années 1980, j'avais remarqué le schéma d'un graphe à cinq sommets correspondant aux cinq configurations centrales, et reliés par des arêtes.

Un «chemin» sur un graphe est un parcours qui va de sommet en sommet, en passant par les arêtes reliant ces sommets. Rick Moeckel avait démontré que, si l'on suppose les masses des trois corps suffisamment proches, tout chemin sur ce graphe correspond à une solution du problème des trois corps qui s'approche >

GRAPHE DE MOECKEL



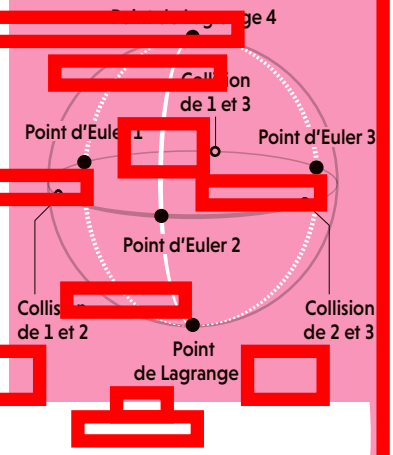
> tour à tour des configurations centrales associées à chaque sommet que le chemin visite.

Par exemple, au chemin E1-L4-E2-L5 correspond une solution qui commence par une éjection très près de la solution d'éjection-collision associée au point d'Euler 1 – les trois astres sont alors presque alignés, comme dans E1 –, grandit jusqu'à un maximum, s'approche ensuite de la phase de collision de la solution associée au point de Lagrange 4, formant presque un triangle équilatéral parfait; mais, au lieu de réaliser exactement cette collision triple, les corps s'éloignent de nouveau en une seconde éjection en triangle équilatéral proche de la phase d'éjection associée au point de Lagrange 4. S'ensuivent une quasi-collision proche de celle, alignée, associée au point d'Euler 2, une éjection quasi alignée toujours liée à E2, pour finir très proche de la collision triple en triangle équilatéral associée au point de Lagrange . De plus, si on répète le même chemin sur le graphe de manière périodique, alors il existera une solution correspondante qui sera elle-même périodique.

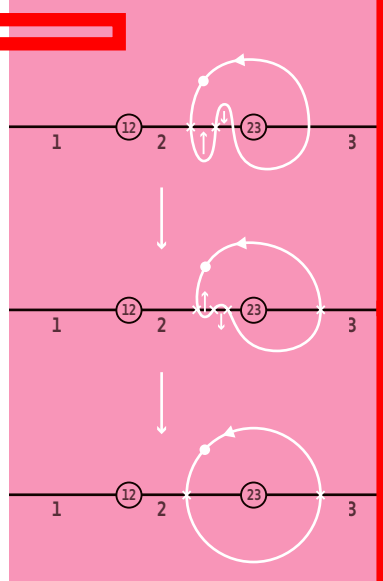
Peu de temps après que Carles Simó m'a suggéré l'existence d'un mécanisme dynamique, je me suis rendu compte que l'on pouvait plonger le graphe de Moeckel dans la sphère des formes. La propriété cruciale de ce graphe inclus dans la sphère est qu'il contient toute la structure topologique de la sphère privée de ses trois points de collision binaire. En effet, on peut déformer la sphère triplement épointée pour la transformer en ce graphe, ce qui transforme en même temps toute courbe fermée (revenant à son point de départ) sur la sphère épointée en un chemin fermé (revenant à son sommet de départ) sur le graphe.

Pour visualiser cette déformation, imaginons que la sphère soit la surface d'un ballon. Avec une aiguille, faisons trois trous dedans – ce qui revient à retirer des points de la surface –, un pour chaque point de collision binaire. Le ballon étant fait d'un matériau infiniment souple et déformable, on peut étirer les trois trous pour les élargir jusqu'à ce que les bords des trois trous se touchent presque et que le matériau restant forme de fins cordons juste autour des arêtes du graphe de Moeckel. En effectuant cette déformation, toute courbe fermée sur la sphère épointée est déformée en une courbe fermée sur ces cordons, et finalement en un chemin fermé sur le graphe de Moeckel.

GRAPHE DE MOECKEL PLONGÉ



SUITE D'ÉCLIPSES



Pour obtenir, à partir de ce processus, un véritable théorème à propos des suites d'éclipses et des solutions du problème des trois corps, je devais prouver que les solutions données par le théorème de Moeckel, vues sur la sphère des formes, ne s'éloignent jamais beaucoup du graphe de Moeckel. En effet, si elles s'en éloignaient, elles pourraient s'enrouler autour des points de collision binaire ou même en rencontrer un, ce qui aurait pour effet d'ajouter ou de supprimer des boucles, et donc de modifier la suite d'éclipses. J'ai donc envoyé un courriel à Rick Moeckel pour lui demander son aide.

Il m'a répondu: « Tu veux me forcer à relire des articles que j'ai écrits il y a plus de vingt ans? » Il s'est néanmoins replongé dans ses anciens travaux et a démontré que les solutions garanties par son théorème ne s'éloignent jamais trop du graphe dans la sphère des formes. Ma question, dans le cas où les masses des corps sont assez proches, était donc résolue – ou presque.

Presque, car Rick Moeckel avait eu besoin d'un petit peu de moment cinétique pour faire fonctionner sa démonstration. À l'inverse, pendant les dix-sept ans de recherches qui avaient précédé ma conversation avec Carles Simó, je ne m'étais intéressé qu'à des solutions de moment cinétique nul. Cela s'expliquait par le fait que les solutions correspondant à des courbes dans l'espace de configuration qui minimisent l'action, c'est-à-dire celles que j'étudiais, ont forcément un moment cinétique nul.

Toujours est-il que Rick Moeckel avait besoin que le moment cinétique soit petit, mais non nul, pour que les solutions restent bien près du graphe dans la sphère des formes. Intuitivement, ce moment cinétique non nul est nécessaire pour que ces solutions puissent s'approcher des configurations d'Euler ou de Lagrange, puisque ces dernières ont un moment cinétique non nul (les corps y tournent dans le « même sens ») et que cette grandeur est constante.

Il restait une autre difficulté dans le résultat de Rick Moeckel: ses solutions, lorsqu'elles croisaient l'équateur de la sphère des formes près des points d'Euler E1, E2 ou E3, oscillaient de part et d'autre de l'équateur plusieurs fois avant de finir par s'en éloigner pour rejoindre l'un des points de Lagrange aux pôles. Pour prendre en compte ces oscillations, je dois introduire ici une nouvelle notion: si N est un entier strictement positif, on dit qu'une suite est « N-longue » lorsque,

chaque fois qu'un nombre apparaît dans la suite, il est présent au moins *N* fois d'affilée. Par exemple, la suite 11122223333322 est 3-longue, mais pas 4-longue, puisqu'il n'y a que trois « 1 » d'affilée.

Voici donc le théorème final auquel nous avions abouti avec Rick Moeckel. Considérons le problème des trois corps avec un moment cinétique non nul et des masses proches. Alors il existe un grand entier naturel *N* vérifiant la propriété suivante : pour n'importe quelle suite d'éclipses *N*-longue, il existe une solution correspondante du problème des trois corps ayant exactement cette suite d'éclipses. Et si la suite est périodique, alors il existe même une solution périodique qui réalise cette suite d'éclipses.

Et ma question originelle ? Aucun entier *N* n'y apparaissait, et j'y recherchais un résultat valide pour toute suite d'éclipses… On était assez loin du compte ! En fait, je ne vous ai pas donné ma vraie question. Ce que je voulais vraiment savoir, c'était si l'on pouvait réaliser n'importe quel « type topologique » de courbe périodique, et non toute suite d'éclipses (on peut définir intuitivement le type topologique comme le « motif d'enroulement » de la courbe autour des trous). J'utilisais la suite d'éclipses comme un raccourci pour cette autre notion, en encodant le type topologique dans la suite d'éclipses.

Mais cette représentation d'un type topologique au moyen de sa suite d'éclipses est redondante : beaucoup de suites d'éclipses différentes encodent le même type topologique. Considérons, par exemple, le type topologique « tourner une fois dans le sens antihoraire autour du point 23 ». La suite d'éclipses 23 représente ce type topologique. Mais c'est aussi le cas des suites 2223, 222223 ou 2333. En effet, chaque fois que l'on traverse deux fois d'affilée l'arc 2, on peut « oublier » ces deux traversées en déformant les méandres, pour faire en sorte que la courbe traverse l'arc deux fois de moins. De cette façon, on supprime toute paire consécutive du même nombre apparaissant dans une suite d'éclipses sans changer le type topologique de la courbe représentée par cette suite. Cette simplification des suites d'éclipses n'a pas de sens physique, car certaines solutions – qui ont donc une réalité physique – ont des suites d'éclipses présentant des répétitions.

Pour répondre maintenant à ma question grâce à notre théorème principal, remarquons qu'en supprimant une à une les paires de nombres égaux consécutifs, on obtient une suite d'éclipses associée au même type topologique de courbe et qui n'a jamais deux nombres égaux consécutifs : elle ne contient pas les motifs 11, 22 ou 33. Nommons une telle suite une « suite admissible ». Considérons alors une suite admissible, par exemple 123232

En cas de moment cinétique nul, la réponse à ma question de départ est « non »

Choisissons un nombre entier impair n supérieur ou égal à l'entier *N* de notre théorème, et remplaçons la suite admissible par la suite $1^n2^n3^n2^n3^n2^n$, prolongée périodiquement, où les exposants signifient ici que l'on répète le nombre (par exemple, $1^3=111$). Par construction, cette suite représente le même type topologique que la suite admissible, car n est impair. Notre théorème nous assure que cette nouvelle suite d'éclipses est réalisée par une solution périodique. Cette solution périodique ayant le même type topologique que la suite de départ, on a montré que la réponse à ma question à propos des types topologiques était « oui ».

QUELLES PERSPECTIVES ?

Il reste encore beaucoup à faire. Quand j'ai posé ma question à propos des types topologiques, il y a vingt ans, je ne m'intéressais qu'à des solutions de moment cinétique nul ; or de plus en plus d'indices liés à des travaux menés ces dernières années suggèrent que la réponse à ma question de départ est « non » en cas de moment cinétique nul. Par exemple, on a des raisons de penser que même le type topologique de la suite périodique non vide la plus simple, 23, n'est jamais réalisé par une solution périodique du problème des trois corps avec des masses toutes égales et à moment cinétique nul.

Quant à la version de la question formulée en termes de suites d'éclipses et non de types topologiques, elle reste encore sans réponse, même pour des moments cinétiques non nuls, puisque le théorème ne permet de réaliser que des suites d'éclipses *N*-longues pour un certain entier *N* suffisamment grand. Par exemple, nous ne savons absolument pas comment réaliser des suites admissibles.

En fin de compte, nous n'avons peut-être pas beaucoup avancé dans la résolution complète du problème des trois corps, mais, en chemin, nous avons beaucoup appris. Nous allons continuer à chercher, et ce problème sera probablement encore fructueux pour ceux qui s'y intéresseront. Car manifestement, cette énigme classique de l'histoire des mathématiques n'a pas fini de nous étonner. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Moeckel et R. Montgomery, **Realizing all reduced syzygy sequences in the planar three-body problem**, *Nonlinearity*, vol. 28(6), pp. 1919-1935, 2015 (disponible en ligne https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/28/6/1919/pdf).

A. Chenciner et R. Montgomery, **A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses**, *Annals of Mathematics*, vol. 152(3), pp. 881-901, 2000 (sur arXiv : https://arxiv.org/pdf/math/0011268.pdf).

L'ESSENTIEL

> Les anguilles électriques sont des poissons d'eau douce qui chassent à l'électricité.

> Une série d'expériences de laboratoire révèle comment ces animaux se servent d'impulsions électriques pour détecter, paralyser ou tuer leurs proies.

> Ces expériences expliquent aussi pourquoi les décharges électriques que ces poissons infligent à un prédateur en bondissant hors de l'eau sont plus violentes encore que celles qu'elles produisent dans l'eau.

L'AUTEUR



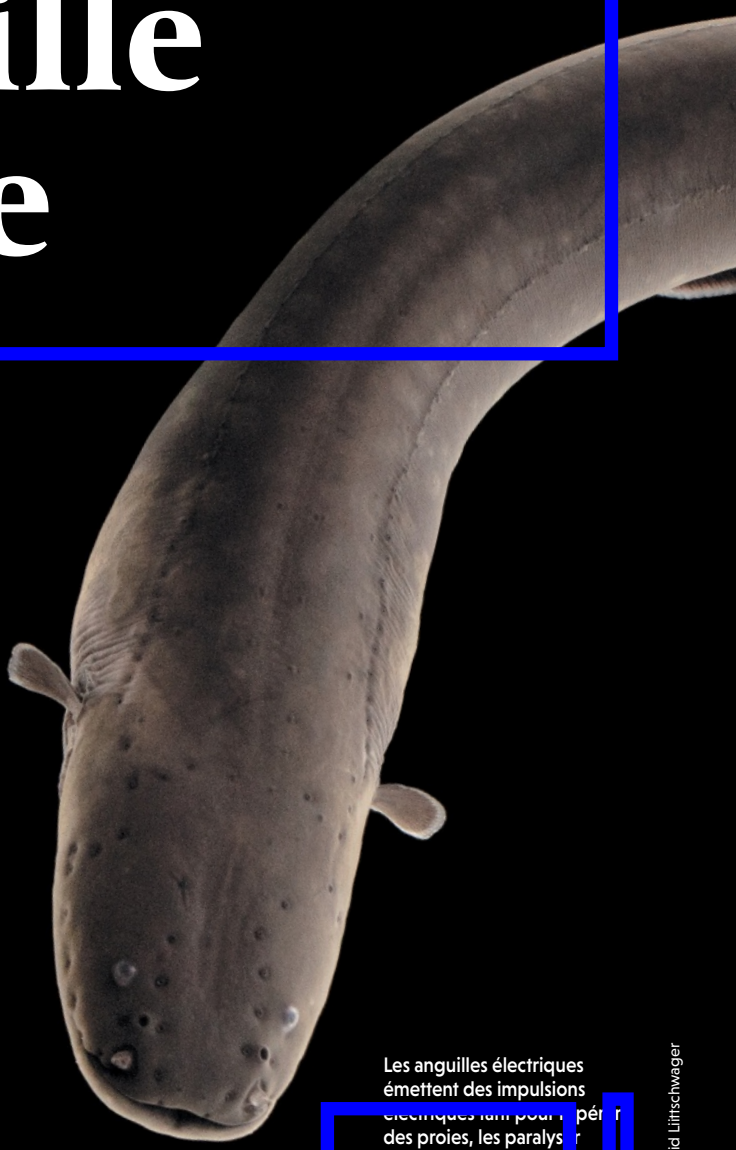
KENNETH C. CATANIA
professeur de biologie à l'université Vanderbilt, à Nashville, dans le Tennessee, aux États-Unis

Les superpouvoirs de l'anguille électrique

Les anguilles électriques produisent des tensions de plusieurs centaines de volts. Comment s'en servent-elles pour se défendre ou pour chasser leurs proies ? Des expériences de laboratoire révèlent les étonnantes adaptations de ces gymnotes.

En Amazonie, certains poissons d'eau douce, les « anguilles électriques », infligent des décharges électriques à d'autres animaux pour les paralyser ou se défendre. Quand j'ai voulu parler de ces poissons à mes étudiants, je me suis rendu compte que nous en savions peu sur leur comportement. J'ai alors acquis quelques anguilles électriques pour mon laboratoire, et ce que j'ai vu alors – des proies soudainement pétrifiées sous l'eau – m'a tellement stupéfait que je me suis précipité dans leur étude ; au point de finir par tendre mon bras à l'une d'entre elles…

Les anguilles électriques semblent dotées d'une sorte de superpouvoir : elles paralysent



Les anguilles électriques émettent des impulsions électriques afin de repérer des proies, les paralyser et les tuer, que pour se défendre.

© David Littschwager



leurs proies à distance. Du reste, mon premier réflexe fut de les comparer au Taser, ce pistolet électrique utilisé par les policiers pour immobiliser une personne à distance. Cet appareil crée en effet une incapacité neuromusculaire temporaire en interférant avec le contrôle des muscles par le système nerveux.

Le Taser envoie, à travers des fils, 19 impulsions électriques de forte tension par seconde. Les anguilles électriques n'ont nul besoin de fils puisque l'eau est conductrice. À ce détail près, leurs impulsions électriques, d'une durée d'environ deux millisecondes chacune, rappellent tout à fait celles d'un Taser. Toutefois, pendant une attaque, elles peuvent en émettre plus de 400 par seconde, donc beaucoup plus qu'un Taser. Les anguilles électriques sont-elles juste des Tasers vivants à l'efficacité augmentée ?

C'est avec cette question à l'esprit que j'ai entrepris d'élucider l'attaque de l'anguille et les effets de ses décharges électriques. À chaque étape de mon parcours, j'ai été surpris par son utilisation complexe de l'électricité.

D'IMPRESSIONNANTES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

Les anguilles électriques (qui n'ont pas de rapport de parenté avec l'anguille d'Europe) sont des poissons d'eau douce des eaux amazoniennes. On en reconnaît depuis 2019 trois espèces proches alors qu'auparavant, une seule, *Electrophorus electricus*, était identifiée. Elles appartiennent à la famille des gymnotidés, dont les 41 espèces ont toutes des organes électriques qui leur servent à percevoir l'environnement et à communiquer, par l'intermédiaire de décharges >

> électriques de basse tension. Chez le genre *Electrophorus*, c'est-à-dire les anguilles électriques, ces organes électriques sont devenus capables d'émettre des décharges pouvant dépasser 850 volts de tension, ce qui en fait de véritables armes. Une anguille électrique peut peser plus de 18 kilogrammes et mesurer 2,5 mètres de long. Réparti tout au long du corps, son organe électrique est constitué de milliers d'électrocytes, des cellules particulières en forme de disque qui fonctionnent comme des batteries, chacune d'elles pouvant créer une tension de 0,15 volt.

Pour vérifier que la comparaison avec le Taser était pertinente, je devais observer une anguille chasser. J'ai placé dans son bassin un poisson mort, mais aux nerfs et muscles toujours fonctionnels, et lui ai relié un fil afin de mesurer ses contractions musculaires ; ce poisson était protégé de l'anguille par une barrière conductrice. Puis j'ai ajouté des vers de terre dans le bassin, que le gymnote dévorait après les avoir attaqués par décharges électriques.

Les séries de décharges de forte tension de l'anguille provoquaient des contractions musculaires massives dans le poisson quelque trois millisecondes après chaque attaque électrique, un temps que j'avais déjà mesuré en visionnant les vidéos d'attaque au ralenti. Les anguilles électriques sont donc l'équivalent d'un Taser aquatique. Les expériences ont aussi révélé qu'elles n'activent pas directement les muscles des poissons, mais seulement les nerfs qui y mènent. Chaque décharge de forte tension d'une anguille engendre, dans les nerfs moteurs du poisson, ce que l'on nomme un potentiel d'action, c'est-à-dire une impulsion nerveuse.

Cette observation est remarquable si l'on considère que l'organe électrique de l'anguille est un muscle modifié, activé par les propres nerfs moteurs – eux-mêmes activés par le cerveau – de l'animal. Ainsi, pour chaque décharge de forte tension, un signal de commande naît dans le cerveau de l'anguille, court le long de ses motoneurones – ces neurones dédiés à la transmission des signaux du cortex moteur –, active l'organe électrique, qui l'amplifie ; puis, en passant à travers l'eau, le signal amplifié parvient aux motoneurones des poissons présents à proximité, dont les muscles se figent. Autrement dit, l'anguille dispose d'une sorte de télécommande mentale qui lui permet de paralyser ses proies à distance !

DOUBLETS ÉLECTRIQUES

Cette conclusion suggère que le fonctionnement des muscles des proies de l'anguille a régi en partie l'évolution de son organe électrique. Cette idée en tête, j'ai étudié de plus près les séries de décharges de forte tension. Les écrits d'un chercheur m'ayant précédé m'avaient en effet intrigué : Richard Bauer avait établi en 1979 que les anguilles électriques émettent pendant la chasse des paires d'impulsions électriques séparées de deux millisecondes. J'ai pu observer chacune de mes anguilles de laboratoire émettre de tels « doublets électriques ». À quoi servent-ils ?

Une petite recherche sur la physiologie musculaire m'a révélé que les doublets électriques, ou les paires de potentiels d'action qu'ils créent, provoquent une tension musculaire maximale. Mes observations montraient que les doublets émis par les anguilles entraînent un tremblement soudain du corps de la proie, alors que les séries de décharges paralysent celle-ci de façon continue. Les tremblements convulsifs font vibrer l'eau, ce que l'anguille perçoit. Cela suggérait que l'émission

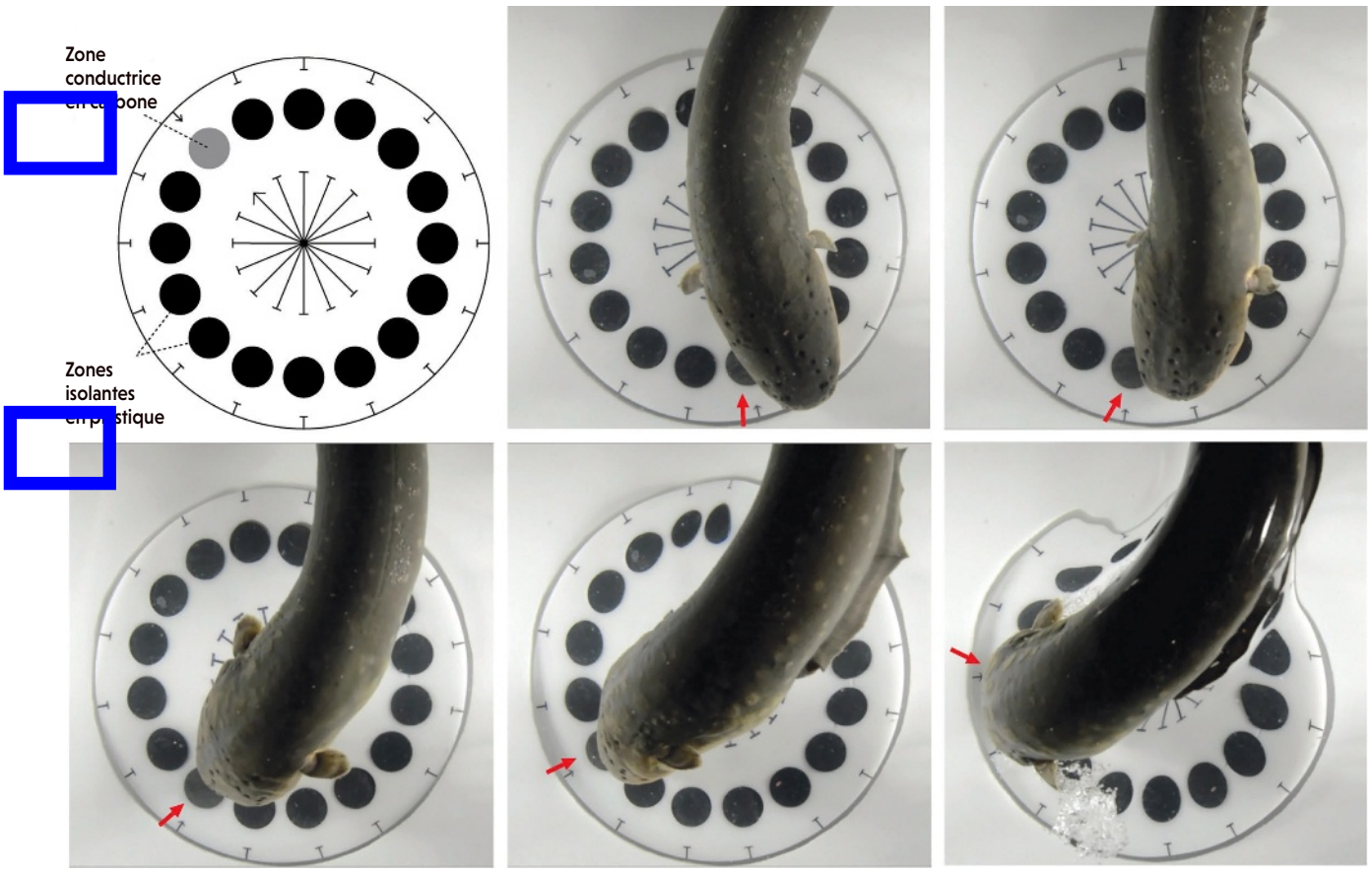
> **Le gymnote constitue un dipôle électrique, sa tête étant le pôle positif**

de doublets par le gymnote est un moyen [illegible] se trahir. Après tout, les anguilles électriques sauvages chassent la nuit dans les eaux amazoniennes, où elles sont entourées d'une très grande diversité de proies dissimulées, des proies beaucoup plus difficiles à repérer que les vers et poissons rouges que je mettais dans le bassin de mes anguilles.

UNE REDOUTABLE CHASSEUSE

Un fait soutient cette idée : quand les anguilles de mon laboratoire avaient affaire à de nouveaux types de proies, telles des écrevisses, ou à des animaux dissimulés sous les plantes du bassin, elles émettaient souvent des doublets électriques, puis attaquaient après le tremblement de la proie, comme si elles avaient été averties.

Ces observations étaient déjà très éloquentes, mais j'ai voulu avoir une preuve directe. J'ai attaché le poisson mort à un stimulateur électrique déclenchable soit par moi, soit par un doublet électrique de l'anguille, puis l'ai placé dans un sac plastique refermable choisi pour le protéger des doublets du gymnote. Ce dispositif m'a permis de contrôler le moment où les muscles du poisson se contractaient. Or



en l'absence de tremblement du poisson, les gymnotes ne réagissaient pas : ils n'attaquaient que si leurs doublets électriques étaient suivis de convulsions du poisson.

L'anguille électrique utilise donc deux types différents de contrôle à distance qui, associés deux, en font une redoutable chasseuse. Avec l'un, l'anguille force les proies à révéler leur présence, puis, avec l'autre, elle les fige.

Être capable de contrôler un autre animal à distance est déjà spectaculaire, mais les « superpouvoirs » de l'anguille ne s'arrêtent pas là. L'animal sait aussi se servir de son organe électrique pour mettre à mort. Ses décharges électriques ont l'inconvénient de se répartir dans tout le volume d'eau qui entoure le gymnote, de sorte que seule une infime fraction de sa puissance électrique atteint la proie. Comment alors celle-ci est-elle tuée ? Le grand physicien anglais Michael Faraday, qui a effectué en 1838 des expériences avec des anguilles électriques, nous a donné la clé pour le comprendre.

Le gymnote constitue un dipôle électrique. En d'autres termes, les lignes représentant son champ électrique émanent de la tête de l'animal, chargée positivement, et se terminent sur sa queue, chargée négativement. La densité de ces lignes en un point donné correspond à l'intensité du champ électrique en ce point ; l'intensité est ainsi maximale aux pôles et diminue très vite avec la distance. Or on apprend dans les cours de physique que l'intensité du champ électrique régnant entre les charges d'un dipôle augmente considérablement lorsqu'on rapproche ces dernières. L'anguille électrique semble avoir fréquenté de tels cours, puisqu'elle rapproche ses pôles dès qu'une proie lui résiste : elle la maintient fermement dans sa gueule (pôle positif) et se courbe pour l'envelopper avec sa queue (pôle négatif), avant d'émettre une série de décharges électriques de forte tension.

Des expériences ont montré que l'anguille électrique peut repérer ses proies en émettant des impulsions électriques de tension élevée. Ainsi, elle repère vite et avec précision la seule zone conductrice placée sur ce disque en rotation rapide, même si elle est visuellement indiscernable des autres.

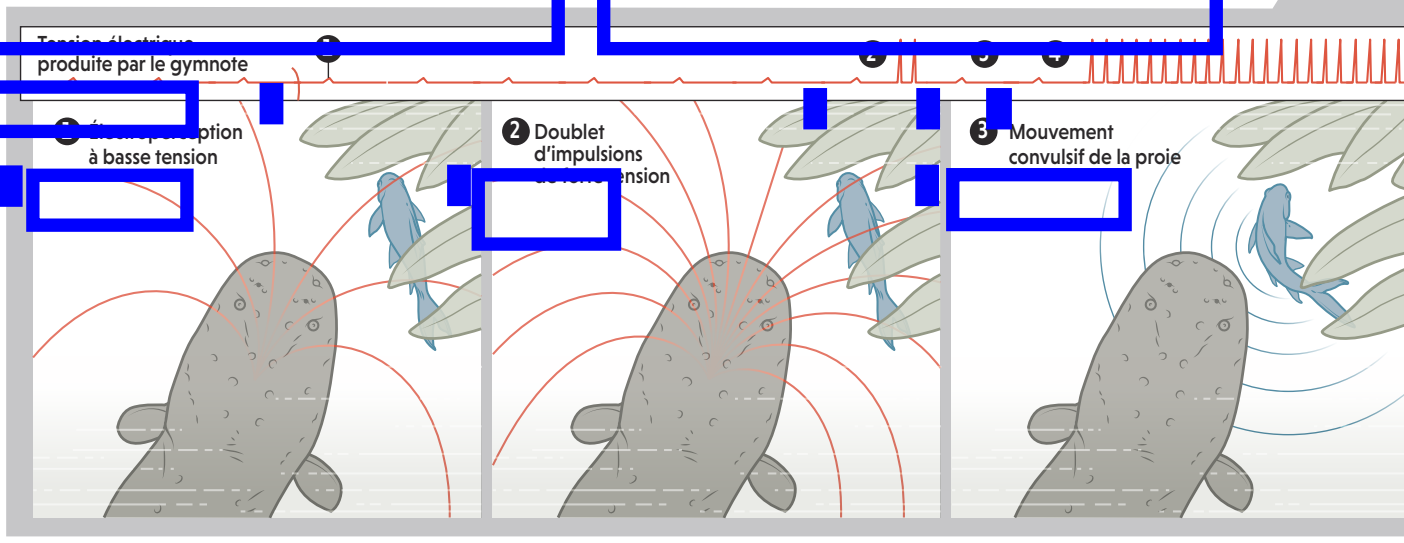
Pour évaluer les effets de cette manœuvre, j'ai conçu un jouet à mâcher spécial pour anguille électrique : une paire d'électrodes enregistrant la tension et montées sur un support en plastique, le tout placé à l'intérieur d'un poisson mort. Quand les gymnotes prenaient ce dispositif dans leur gueule, je secouais les fils reliés aux électrodes afin de simuler le comportement d'une proie récalcitrante. Les anguilles s'enroulaient alors autour du dispositif et le soumettaient à une très forte tension : le champ électrique reçu par la proie factice était le double du champ électrique produit normalement par les anguilles. Ce comportement permet à l'animal de concentrer sa puissance électrique sur une cible afin de mieux la tuer. >

© Kenneth C. Catania

TACTIQUE D'ATTAQUE

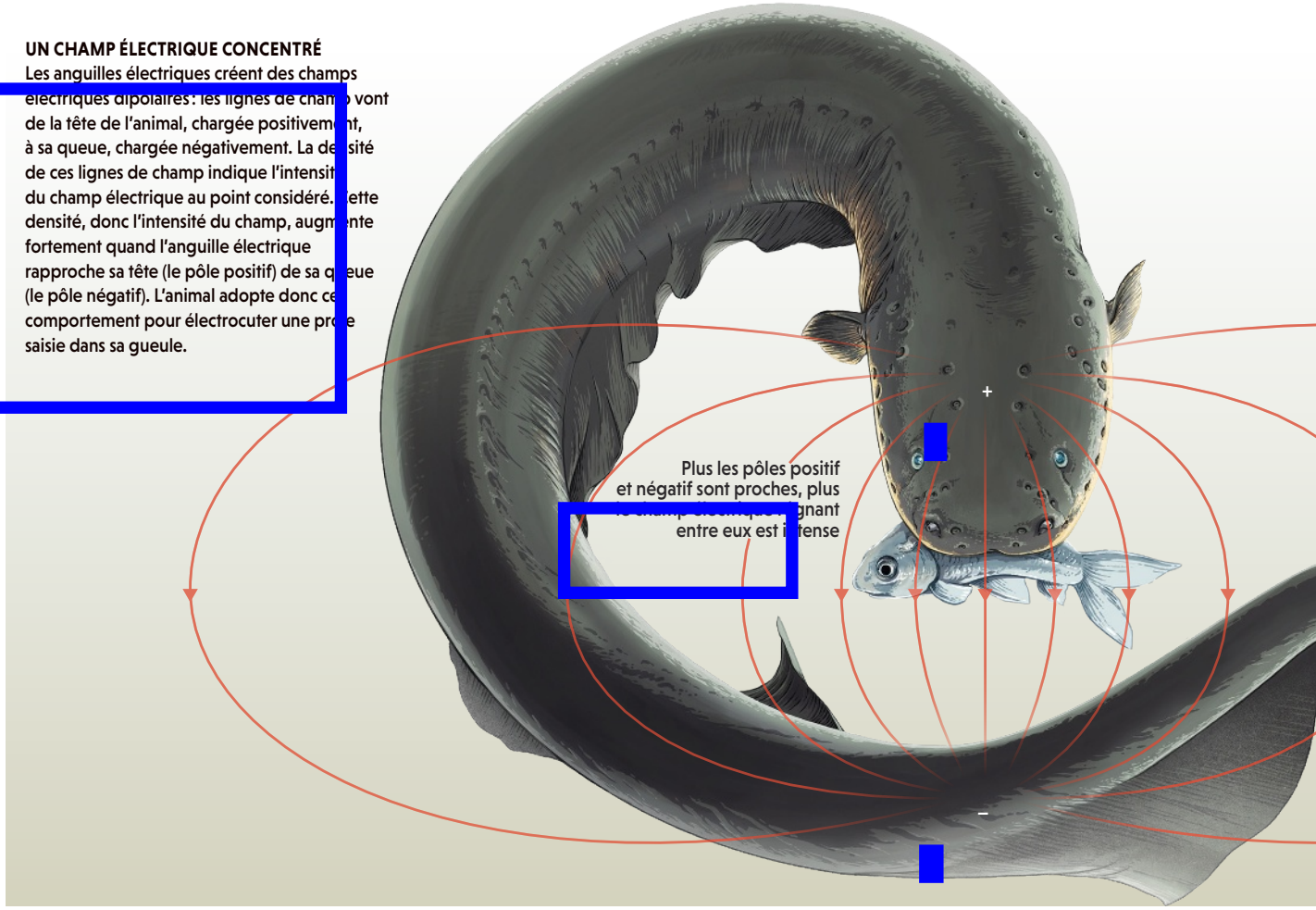
Ces anguilles électriques chassent en émettant des impulsions électriques qui neutralisent leurs proies.

Ces impulsions activent les motoneurones contrôlant les muscles de la proie, laquelle est ainsi paralysée à distance. À tension élevée, l'organe électrique du gymnote lui permet [illegible] : soit pour repérer des proies dissimulées en provoquant chez celles-ci un mouvement convulsif perceptible, soit pour figer ces proies. À tension basse, son organe électrique peut aussi lui servir à suivre à distance les mouvements de ses proies. De plus, l'anguille électrique adopte une posture adaptée pour neutraliser sa proie en milieu aquatique, où la plus grande part de l'électricité des impulsions qu'elle émet se dissipe très vite dans le volume d'eau environnant.



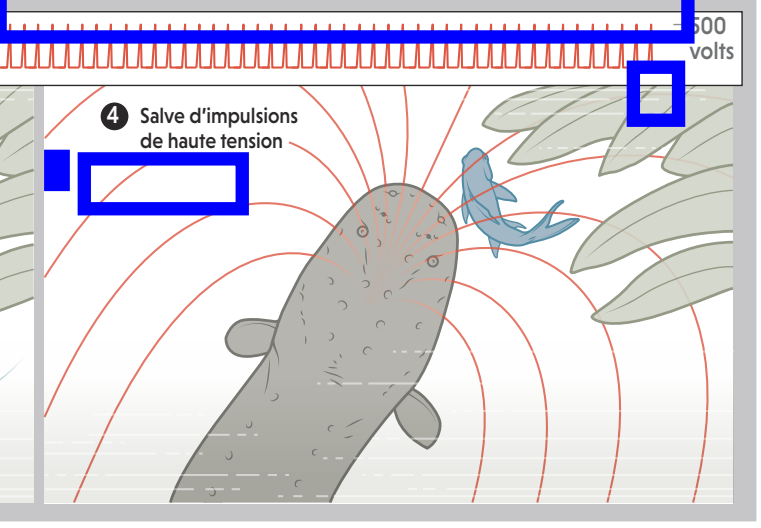
UN CHAMP ÉLECTRIQUE CONCENTRÉ

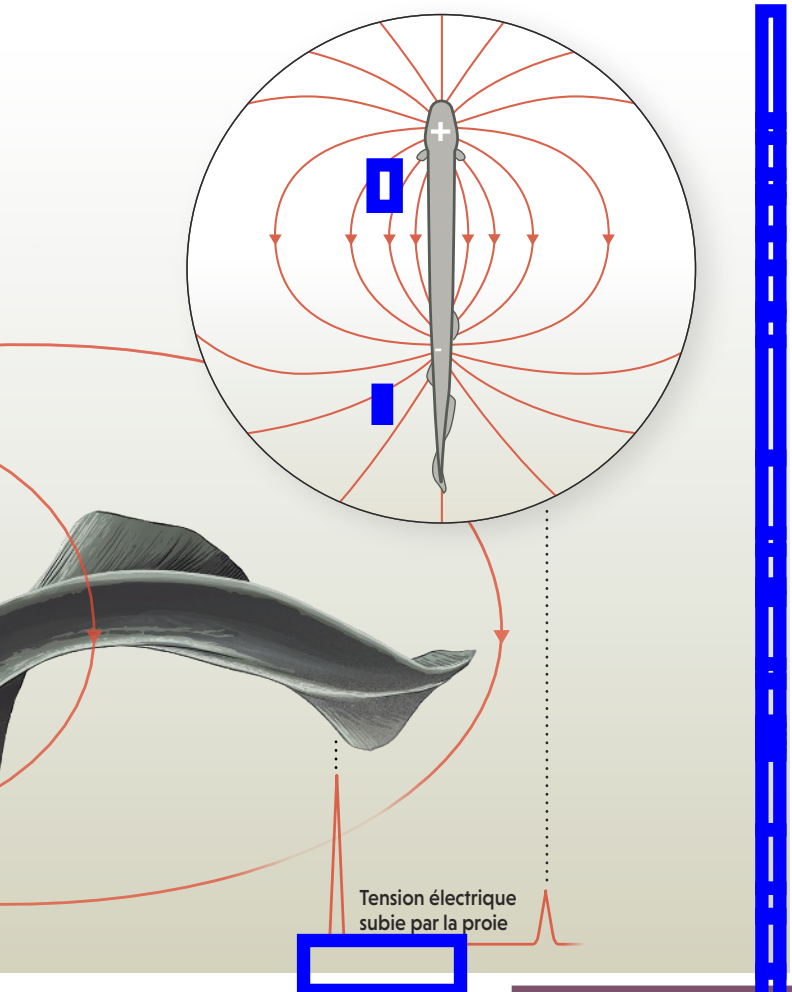
Les anguilles électriques créent des champs électriques dipolaires : les lignes de champ vont de la tête de l'animal, chargée positivement, à sa queue, chargée négativement. La densité de ces lignes de champ indique l'intensité du champ électrique au point considéré. Cette densité, donc l'intensité du champ, augmente fortement quand l'anguille électrique rapproche sa tête (le pôle positif) de sa queue (le pôle négatif). L'animal adopte donc ce comportement pour électrocuter une proie saisie dans sa gueule.



LES STADES D'UNE MISE À MORT

Pour explorer son environnement, l'anguille peut utiliser son organe électrique soit à tension basse, soit à tension élevée ❶. Afin de détecter une proie dissimulée par la végétation, le gymnote émet des paires d'impulsions à forte tension – les doublets électriques – qui provoquent un mouvement convulsif de la proie ❷. Ce brusque mouvement involontaire fait vibrer l'eau, ce que le gymnote perçoit ❸. La proie étant repérée, l'anguille lance une série d'impulsions à tension élevée afin de la paralyser, pendant qu'elle s'approche pour l'aspirer dans sa gueule ❹.





© Matthew Twombly (illustration); sources: K. C. Catania, Current Biology, vol. 25(22), 16 novembre 2015, et K. Catania, Science, vol. 346, 5 décembre 2014

> Des expériences supplémentaires ont montré que l'attaque amplifiée de l'anguille provoque des contractions musculaires à des fréquences élevées, ce qui épuise la proie en quelques secondes. Le phénomène est l'analogue électrique d'une neurotoxine. L'anguille est ainsi capable de capturer et de maîtriser rapidement des animaux dangereux, de grosses écrevisses munies de pinces par exemple.

PLUS QU'UNE ARME

Lors de mes observations de gymnotes en chasse, j'ai eu l'impression que leurs décharges avaient peut-être d'autres fonctions que les attaques. Lorsqu'une anguille électrique attaque pour tuer, elle émet d'abord une série de décharges de forte tension, puis aspire la proie dans sa gueule. Mais je remarquais que quand le poisson mort se tortillait dans un sac de plastique isolant, l'attaque cessait. L'anguille électrique avait émis sa série d'impulsions et frappé le poisson, mais elle interrompait son attaque sans qu'il y ait morsure-succion. Pourquoi ?

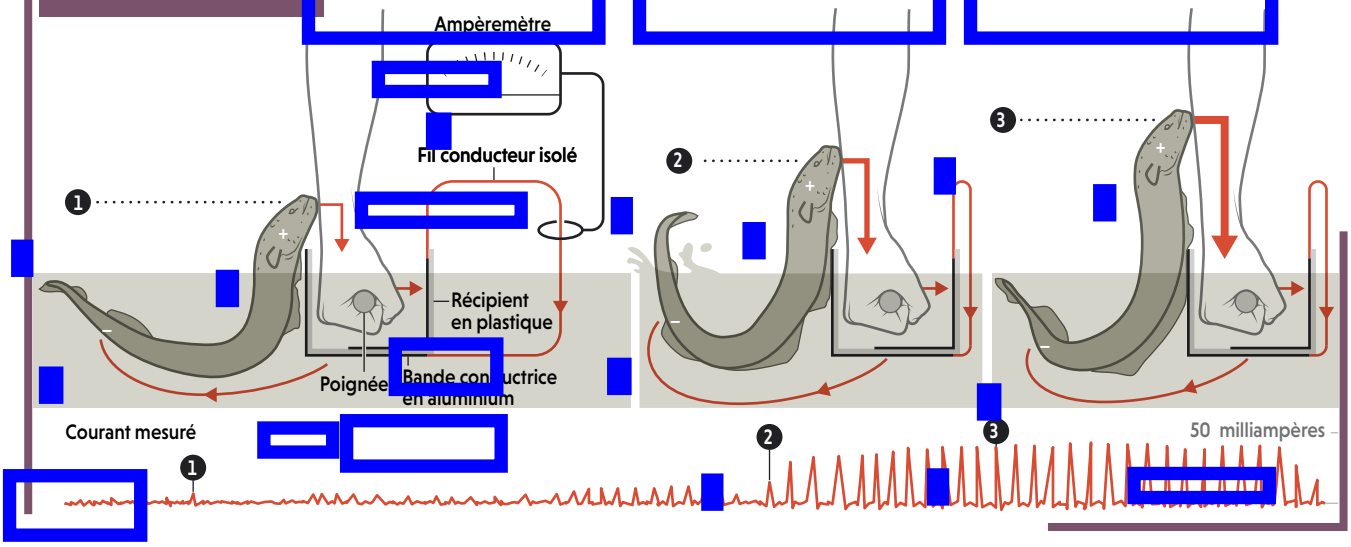
Jusque-là, je supposais que les attaques des gymnotes suivaient une séquence fixée à l'avance, sans rétroaction sensorielle. Puis il m'est venu à l'esprit que les décharges de forte tension leur servaient aussi à faire de la télédétection : cela expliquerait pourquoi ils négligeaient les proies entourées de plastique isolant. Après tout, les anguilles électriques ont évolué à partir de poissons utilisant de faibles champs électriques pour sonder leur environnement, et ont manifestement conservé cette faculté. Mais quand la mettaient-elles à profit ? Les impulsions de haute tension étaient-elles à l'œuvre pour sonder le milieu ? J'ai décidé d'explorer cette possibilité.

Pour ce faire, je me suis servi des propriétés conductrices de la proie et du comportement de chasse de l'anguille. Les animaux vivant dans l'eau douce sont généralement plus conducteurs que l'eau, de sorte qu'une anguille électrique s'intéresse avant tout aux objets conducteurs, qui lui semblent vivants. Gardons toutefois à l'esprit qu'un gymnote peut détecter ces conducteurs grâce à son système électrique à basse tension, qui reste actif jusqu'à ce que ce prédateur passe à l'attaque et aux fortes tensions électriques. Pour mettre en évidence ses perceptions à tension élevée, il me fallait analyser son comportement au ralenti au cours des attaques, quand le système à basse tension n'est pas actif et que seul le système à haute tension l'est.

Une première expérience a consisté à ajouter un conducteur inerte (une tige en carbone) dans l'aquarium près du poisson mort se contractant dans le sac refermable. Une fois de plus, l'anguille n'a attaqué que lorsqu'elle a détecté le mouvement de l'eau déclenché par la contraction du poisson et a frappé vers le sac >

LA MEILLEURE DES DÉFENSES

Les anguilles électriques sautent souvent hors de l'eau pour administrer une décharge électrique ce qu'elles perçoivent comme une [illegible] le courant traversant un bras humain pendant ce type d'attaque, l'auteur a conçu un dispositif expérimental où il présente son propre bras à une anguille juvénile ❶. Plus l'anguille s'élève hors de l'eau, plus le courant qui circule habituellement de la tête à la queue est remplacé par un courant, nettement plus fort, qui circule à travers la cible, c'est-à-dire ici le bras ❷. Au point culminant du saut de l'animal, le courant qu'il engendrait a atteint 45 milliampères, une décharge fortement répulsive, qui a déclenché chez l'auteur le réflexe de retirer son bras ❸. Les anguilles de grande taille produisent *a priori* des courants nettement plus intenses.



> isolant contenant le poisson mort. Toutefois, elle a changé de cap à mi-chemin et tenté de manger la tige carbone en combinant succion et morsure comme lors de chaque attaque. Comme on pouvait s'y attendre dans le cas où les impulsions de tension élevée lui servent aussi à suivre ses proies, elle semblait interpréter la tige de carbone comme un poisson.

C'était un bon début, mais j'avais besoin de preuves plus solides. J'ai donc réalisé des expériences en plaçant des tiges de carbone et de multiples tiges de plastique afin de prendre en compte la possibilité que l'anguille discrimine les cibles à l'aide de sa vue. Toutes les anguilles ont attaqué le conducteur en carbone par des séries de décharges à tension élevée.

REPÉRAGE RAPIDE ET PRÉCIS

Ma dernière expérience a consisté à présenter aux anguilles électriques un disque en rotation rapide comportant à sa surface une petite zone conductrice et une série de zones isolantes d'aspect identique (*voir l'illustration page 39*). Les performances des anguilles m'ont impressionné : elles ont pu suivre et attaquer l'élément conducteur, au cours d'une même série d'impulsions à forte tension, avec une précision et une rapidité que l'on n'avait jamais constatées chez les animaux à électroperception active.

Plus aucun doute n'était possible : même aux tensions élevées, l'appareil électrique de ces gymnotes est non seulement une arme, mais aussi un organe sensoriel permettant de repérer les proies. Le respect que m'inspiraient les anguilles électriques grandissait de jour en jour ; ce qui était bienvenu, puisque j'allais subir l'attaque de l'une d'elles…

DÉFENSE ÉPOUSTOUFLANTE

En mars 1800, le naturaliste prussien Alexander von Humboldt engagea des villageois d'Amazonie pour attraper des anguilles électriques, et décrivit l'opération. Les villageois firent venir une trentaine de chevaux et de mulets, qu'ils forcèrent à entrer dans une mare pleine d'anguilles. Leur but était que les anguilles électriques attaquent les chevaux jusqu'à ce qu'elles soient devenues inoffensives à force de décharger. Deux chevaux moururent dans l'affaire et d'autres, fortement atteints, s'effondrèrent sur la rive.

Le récit, publié en 1807, fit douter certains savants postérieurs à von Humboldt : pourquoi les gymnotes prendraient-ils le risque de s'attaquer à des animaux trop gros pour constituer des proies ? Pendant plus de deux siècles, aucun comportement analogue d'attaque n'a été rapporté – jusqu'au jour où, dans mon laboratoire, je me suis trompé d'épuisette pour attraper une grosse anguille électrique.

En général, les anguilles électriques ne sautent pas hors de leur aquarium, sauf si vous en coincez une en vous en approchant avec un

© Matthew Twombly (illustration) ; source : K. C. Catania, Current Biology, vol. 27(18), 25 septembre 2017

gros objet conducteur émergeant de l'eau. Elles réagissent alors par une attaque explosive. Ce comportement littéralement choquant m'est apparu lorsque j'ai tenté de capturer une grosse anguille à l'aide d'une épuisette dont le bord et la poignée étaient en métal. Elle s'est retournée et a bondi hors de l'eau tandis que sa mâchoire inférieure restait appuyée contre la poignée métallique et qu'elle émettait une longue série de décharges de forte tension (heureusement, je portais des gants de protection). C'est un comportement défensif que j'ai retrouvé chez toutes les anguilles électriques testées.

En analysant les phénomènes électriques qui ont accompagné le bond de mon anguille, de nombreuses pièces du puzzle biologique et historique se sont mises en place. Si les anguilles interprètent les petits objets conducteurs comme des proies comestibles, elles interprètent comme de gros animaux menaçants les grands objets conducteurs partiellement submergés qui s'approchent. *A priori*, elles pourraient fuir à la nage, mais il se trouve que pendant la saison sèche, elles se voient souvent piégées dans des mares à la portée de prédateurs tels que caïmans ou félins. Ajoutez à ce scénario le fait que les anguilles ne peuvent pas diriger leurs impulsions électriques et vous aurez la recette d'un étonnant mode de défense expliquant le récit de von Humboldt.

DES TESTS AVEC DES BRAS DE ZOMBIE

Pour en savoir plus, je me suis procuré des bras de zombie postiches, que l'on vend aux États-Unis lors des fêtes d'Halloween. Après en avoir retiré le faux sang, j'y ai placé des diodes électroluminescentes de façon à imiter le passage des voies nerveuses, puis j'ai présenté cette nouvelle cible à mes anguilles. Cela a déclenché des bonds défensifs, et les diodes ont d'autant plus clignoté que l'anguille s'éloignait vait loin de l'eau. Comment expliquer cela?

Répondre à cette question implique de déterminer le circuit électrique équivalent à l'ensemble gymnote+gros objet conducteur afin de pouvoir déterminer la tension, ou force électromotrice, de l'organe électrique. Je devais également calculer la résistance électrique des matériaux du circuit. J'ai mesuré chaque variable successivement, en commençant par l'organe électrique de l'anguille. Longue d'un peu plus d'un mètre, la plus grosse anguille de mon laboratoire avait un potentiel électrique de 382 volts et une résistance interne de seulement 450 ohms, ce qui, en l'absence d'autres résistances, donne des intensités de courant de près de un ampère. Clairement, une anguille électrique est plus violente qu'un Taser!

Lorsque l'anguille bondit hors de l'eau en appuyant sa mâchoire inférieure contre une cible, le courant qui circule habituellement de la tête vers la queue s'affaiblit, car l'air, mauvais conducteur, tend à l'interrompre, de sorte que c'est le courant à travers la cible qui augmente. Cela explique les impressionnants bonds du gymnote: plus ils sont hauts, plus l'épaisseur d'air isolant la tête de la queue est grande, et plus l'intensité du courant dans la cible est importante.

Pour préciser les choses, j'ai dû résoudre un exercice de physique élémentaire: calculer le courant électrique dans un circuit comportant deux résistances en parallèle. Il fallait pour cela déterminer chacune de ces résistances. J'ai obtenu la première – celle du corps de l'anguille – en faisant attaquer des gymnotes une plaque métallique reliée à un voltmètre. L'autre résistance à déterminer était celle du bras postiche servant de cible. Après avoir précisé toutes les autres variables du problème, je suis parvenu à estimer la résistance électrique complexe s'établissant entre la mâchoire de l'anguille électrique, une cible vivante et l'eau baignant l'ensemble.

Je me suis aussi servi de mon propre bras afin de déterminer la dernière variable et de pouvoir tester les résultats de toutes les mesures précédentes. J'ai fait appel à une toute petite anguille présentant une force électromotrice de seulement 198 volts et une résistance interne de 960 ohms, et construit un dispositif capable de mesurer le courant à travers mon bras pendant l'attaque du gymnote. C'est ainsi que j'ai résolu l'exercice de physique que je m'étais posé et éprouvé dans ma chair à quel point les anguilles électriques sont efficaces quand elles attaquent... ■

TROIS ESPÈCES D'ANGUILLES ÉLECTRIQUES

Autour de David de Santana, de la Smithsonian [illegible] a étudié l'anatomie et l'ADN de 107 anguilles électriques [illegible] au Guyana. Les résultats révèlent l'existence de trois populations [illegible] une seule reconnue précédemment, *Electrophorus electricus*. Celle-ci vit au nord, principalement au Guyana et au Suriname ; *Electrophorus varii* est disséminé le long des basses terres amazoniennes jusqu'au nord du Brésil et en Guyane française ; et *Electrophorus voltai* vit au sud du bassin amazonien, au Brésil.

Les chercheurs ont mis en évidence des différences anatomiques subtiles entre ces espèces, qui se seraient [illegible] le grand bassin amazonien s'est formé il y a quelque 3 millions d'années. Ils ont aussi établi que *E. voltai* peut produire des tensions de 860 volts, bien plus que les 650 volts cités jusqu'à présent pour les anguilles électriques. C'est un record absolu dans le monde vivant.

BIBLIOGRAPHIE

C. David de Santana *et al.*, [illegible] **with a description of the strongest living bioelectricity generator,** *Nature Communications*, vol. 10, article 4000, 2019.

K. C. Catania, **Power [illegible] shocking leap,** *Current Biology*, vol. 27(18), pp. 2887-2891, 2017.

K. C. Catania, **Electric eels [illegible] fast-moving prey,** *Nature Communications*, vol. 6, article 8638, 2015.

K. C. Catania, **The [illegible] of the electric eel,** *Science*, vol. 346, pp. 1231-1234, 2014.



L'ESSENTIEL

> Deux théories s'opposent sur la nature de la conscience : celle de « l'espace de travail neuronal global » et celle de « l'information intégrée ».

> L'une implique que les machines deviendront conscientes lorsqu'elles auront des capacités suffisamment sophistiquées, l'autre non.

> Ces théories sont actuellement testées par une collaboration internationale.

L'AUTEUR



CHRISTOF KOCH
directeur scientifique et président de l'Institut Allen pour les sciences du cerveau, à Seattle, aux États-Unis

Les machines peuvent-elles être conscientes?

Nul doute que les robots et ordinateurs deviendront de plus en plus «intelligents». Mais auront-ils une subjectivité et un sentiment d'exister? Cette question est autrement plus débattue.

Dans les décennies à venir, les progrès rapides des algorithmes d'apprentissage engendreront des machines d'une intelligence comparable à la nôtre. Capables de parler et de raisonner, elles auront leur place dans une myriade de domaines tels que l'économie, la politique et, inévitablement, la guerre. La naissance d'une véritable intelligence artificielle (IA) aura un impact profond sur l'avenir de l'humanité et conditionnera l'existence même d'un tel avenir.

Prenez par exemple la citation suivante: «Encore aujourd'hui, des recherches sont en cours pour mieux comprendre ce que les nouveaux programmes d'IA seront capables de faire, tout en restant dans les limites de l'intelligence d'aujourd'hui. La plupart des programmes d'IA actuellement programmés se limitent principalement à prendre des décisions simples ou à effectuer des opérations simples sur des quantités relativement faibles de données.»

Peut-être avez-vous eu l'impression que quelque chose clochait dans ce paragraphe. Cette citation est l'œuvre de GPT-2, un robot linguistique que j'ai testé l'été dernier. Développé par OpenAI, un institut basé à San Francisco qui promeut les IA «vertueuses», GPT-2 est un algorithme d'apprentissage fondé sur un réseau de neurones artificiels. Ses entrailles contiennent plus d'un milliard de connexions simulant des synapses, les points de jonction entre neurones.

IL NE COMPREND RIEN, ET POURTANT...

La tâche du réseau est apparemment stupide: confronté à un texte de départ arbitraire, il doit prédire le mot suivant. Il ne «comprend» pas les textes comme le ferait un humain. Mais durant sa phase d'apprentissage, il a dévoré des quantités astronomiques de textes – huit millions de pages



© Sarah Holmlund / shutterstock.com

> internet en tout – et ajusté ses connexions internes pour mieux anticiper des suites de mots.

J'ai écrit les premières phrases de l'article que vous êtes en train de lire, puis je les ai «injectées» dans l'algorithme en lui demandant de composer une suite. Il a notamment craché le paragraphe cité. Certes, ce texte ressemble aux efforts d'un étudiant de première année pour se rappeler un cours d'introduction à l'apprentissage automatique durant lequel il a dormi rêvassé. Mais le résultat contient malgré tout les mots et les phrases clés – pas si mal, vraiment!

Les successeurs de ces robots risquent de déclencher un raz-de-marée de faux articles et reportages, qui viendront polluer internet. Ce ne sera qu'un exemple de plus de programmes exécutant des prouesses que l'on croyait réservées aux humains: jouer à des jeux de stratégie en temps réel, traduire du texte, recommander des livres et des films, reconnaître les gens sur des images ou des vidéos…

Les algorithmes sauront-ils un jour écrire un chef-d'œuvre aussi abouti que *À la recherche du temps perdu*, de Marcel Proust? Difficile à dire, mais les prémices sont là. Rappelez-vous comme les premiers logiciels de traduction et de conversation étaient faciles à tourner en dérision, tant ils manquaient de finesse et de précision. Mais avec l'invention des réseaux neuronaux profonds et la mise en place d'infrastructures de calcul surpuissantes par les entreprises du numérique, les ordinateurs se sont améliorés sans relâche, jusqu'à ce que leurs productions n'aient plus rien de ridicule.

Comme on le voit avec le jeu de go, les échecs et le poker, les algorithmes d'aujourd'hui sont capables de surpasser les humains. (En novembre 2019, Lee Sedol, un des plus grands joueurs de go de l'histoire, a décidé de prendre sa retraite après avoir perdu plusieurs fois contre l'algorithme AlphaGo; il a déclaré que celui-ci était une entité ne pouvant plus être vaincue). Si bien que notre rire se fige: sommes-nous comme l'apprenti sorcier de Goethe, ayant invoqué des esprits serviables que nous ne pouvons plus contrôler?

L'INTELLIGENCE N'EST PAS LA CONSCIENCE

Bien que les experts ne s'accordent pas sur la nature exacte de l'intelligence, la plupart d'entre eux estiment que, tôt ou tard, les ordinateurs atteindront ce que l'on appelle l'intelligence artificielle générale dans le jargon (c'est-à-dire qu'ils deviendront capables de réaliser n'importe quelle tâche intellectuelle accessible à un humain). Mais auront-ils pour autant une forme de sentiment d'eux-mêmes? En d'autres termes, pourront-ils un jour être conscients?

Par «conscience» ou «sentiment subjectif», j'entends une qualité inhérente à toute expérience – par exemple, la saveur d'une madeleine, une rage de dents, l'étirement du temps quand on s'ennuie ou le sentiment de vitalité et d'anxiété juste avant une compétition. En paraphrasant le philosophe Thomas Nagel, auteur d'un article titré *Quel effet cela fait-il d'être une chauve-souris?*, nous pourrions dire qu'un système est conscient si cela «fait quelque chose» *d'être* ce système.

Considérez l'embarras que vous ressentez lorsque vous vous apercevez que vous venez de commettre une gaffe, parce que votre interlocuteur a perçu comme une insulte ce qui n'était pour vous qu'un trait d'humour. Les ordinateurs éprouveront-ils un jour une telle émotion? Et lorsque vous êtes au téléphone depuis un temps interminable, écoutant une voix synthétique répéter en boucle: «Nous sommes désolés de vous faire attendre», le logiciel pourra-t-il se sentir gêné de vous maintenir dans cet enfer du service client?

Il ne fait guère de doute que notre intelligence et nos expériences résultent des capacités naturelles de notre cerveau, fondées sur des enchaînements de causes et d'effets. Cette prémisse a extrêmement bien servi la science au cours des derniers siècles. Le cerveau humain, cet organe d'à peine un kilo et demi à la texture comparable au tofu, est de loin le morceau de matière active organisée le plus complexe connu de l'Univers. Mais il obéit aux mêmes lois physiques que les pierres, les arbres et les étoiles. Rien n'échappe à ces lois. Nous ne comprenons pas encore tout à fait les mécanismes causaux en jeu, mais nous les expérimentons tous les jours: un groupe de neurones s'allume pendant que vous voyez des couleurs, tandis que l'activation de cellules nerveuses dans une région voisine du cortex est associée à une humeur joviale. Lorsqu'un neurochirurgien stimule ces neurones à l'aide d'une



La théorie de l'information intégrée a inspiré la construction d'un appareil pour mesurer le niveau de conscience chez des patients incapables de communiquer. Il est ici testé par l'équipe de Steven Laureys, au Coma science group de l'université et du CHU de Liège.

© Coma Science group

LA FRANCE EST-ELLE CONSCIENTE ?

Selon la théorie de l'information intégrée, le degré de conscience d'un système dépend de son pouvoir causal intrinsèque – qui quantifie la capacité de ses sous-systèmes à s'influencer mutuellement. Mais alors, tout ensemble doté de parties en interaction n'est-il pas conscient ? N'est-ce pas le cas par exemple de l'ensemble que vous formez avec votre interlocuteur au téléphone, voire de celui formé par la population d'un pays entier ? Non, car la théorie postule qu'à l'intérieur d'un système, la conscience apparaît précisément là où le pouvoir causal intrinsèque est maximum. Si vous parlez avec quelqu'un, vous allez vous influencer mutuellement, mais de façon très inférieure à ce qui se passe dans le cerveau de chacun. Il n'y aura donc pas formation d'un « superesprit » – pour cela, il faudrait augmenter drastiquement les connexions entre vos deux cerveaux. Il en va de même pour un pays comme la France et ses 67 millions d'habitants : même s'il y a de multiples interactions entre ces derniers, le pouvoir causal intrinsèque reste maximal à l'intérieur du cerveau de chacun. C'est donc là que surgit la conscience.

électrode, le sujet voit des couleurs dans le premier cas, éclate de rire dans le second. Inversement, quand le cerveau est sous anesthésie, ces expériences disparaissent.

Compte tenu de cela, l'évolution de l'intelligence artificielle débouchera-t-elle sur une conscience artificielle?

DEUX THÉORIES ANTAGONISTES

Cette question mène à deux possibilités fondamentalement différentes. Selon la première, les machines vraiment intelligentes seront sensibles et dotées de conscience : elles parleront, raisonneront, s'occuperont d'elles-mêmes, seront capables d'introspection... Une idée dans l'air du temps, comme on le voit dans des romans et des films tels que *Blade Runner*, *Her* ou *Ex Machina*.

D'un point de vue scientifique, cette hypothèse s'appuie sur l'une des principales théories de la conscience, dite de «l'espace de travail neuronal global» (GNW, pour *global neuronal workspace*). Cette théorie considère que l'origine de la conscience réside dans certaines caractéristiques architecturales du cerveau. Elle s'inspire en cela de l'«architecture du tableau noir», développée par les sciences informatiques dans les années 1970: le principe est que des programmes spécialisés accèdent à un répertoire commun d'informations, appelé tableau noir ou espace de travail central. Les psychologues ont postulé qu'un espace de ce type existe dans le cerveau et qu'il est essentiel à la cognition humaine. Sa capacité est faible, de sorte qu'à un moment donné, il ne contient qu'une seule perception, qu'une pensée unique ou qu'un seul souvenir. Dans cet espace de travail, les nouvelles informations entrent en concurrence avec les anciennes et les remplacent.

Le neuroscientifique Stanislas Dehaene et le biologiste moléculaire Jean-Pierre Changeux, tous deux au Collège de France, à Paris, ont transposé ces idées à l'architecture du cortex, la couche externe du cerveau. Ils ont postulé que l'espace de travail repose sur un réseau de neurones dits «pyramidaux», qui relient des régions corticales éloignées, en particulier les zones associatives préfrontales, pariétotemporales et médianes (cingulaires).

Une grande partie de l'activité cérébrale reste localisée et de ce fait n'accède pas à la conscience. C'est le cas des modules neuronaux qui contrôlent la posture du corps ou la direction du regard. Mais lorsque l'activité d'une ou plusieurs régions dépasse un seuil critique – disons, lorsqu'on présente à quelqu'un l'image d'une friandise appétissante –, elle déclenche une vague d'excitation neuronale qui se propage à travers l'espace de travail, dans tout le cerveau. Ce signal devient alors accessible à une multitude de processus auxiliaires, tels que le langage, la planification, le circuit de la récompense, la mémoire à long terme et le stockage dans une mémoire tampon à court terme.

Ce serait le fait de diffuser cette information à l'échelle globale qui la rendrait consciente. Ainsi, l'expérience subjective de la friandise appétissante résulterait de l'action de neurones pyramidaux qui ordonnent à la région motrice du cerveau de se saisir de la friandise, tandis que d'autres modules neuronaux anticipent une récompense sous la forme d'une poussée de dopamine, causée par le petit *shoot* de sucre et matières grasses à venir.

En d'autres termes, les états conscients découleraient de la façon dont l'algorithme de >

« 1 milliard de synapses virtuelles : c'est ce que contient l'architecture du logiciel linguistique GPT-2 »

> l'espace de travail traite les entrées sensorielles, les sorties motrices et les variables internes liées à la mémoire, à la motivation et aux attentes. La conscience, ce serait ce traitement global. Pour les tenants de cette théorie, la conscience artificielle n'est pas exclue.

LA CONDITION DE LA CONSCIENCE

La seconde hypothèse repose sur la théorie de l'information intégrée (IIT, pour *integrated information theory*), qui adopte une approche plus fondamentale pour expliquer la conscience. Giulio Tononi, psychiatre et neuroscientifique à l'université du Wisconsin-Madison, en est le promoteur principal, avec d'autres collaborateurs, dont moi-même. Le principe est de partir de la nature de l'expérience consciente et d'en déduire les propriétés du système physique qui en constitue le support. Par exemple, chaque expérience forme un tout unique – lorsque je vois une image, je n'ai pas deux expériences conscientes juxtaposées, une de la partie gauche de mon champ visuel et une de la partie droite, mais une seule – et cela doit se traduire d'une façon ou d'une autre dans le système physique sous-jacent.

En particulier, l'information doit y être traitée de façon intégrée, c'est-à-dire que les éventuels sous-systèmes doivent interagir et s'influencer mutuellement. On parle de « pouvoir causal intrinsèque » et on quantifie l'importance de ces influences mutuelles par une mesure mathématique que nous appelons l'« information intégrée ».

Ainsi, le pouvoir causal intrinsèque n'est pas une notion floue et éthérée, mais une quantité susceptible d'être évaluée avec précision. On peut la déterminer pour tout type de mécanisme, par exemple un neurone qui émet des potentiels d'action affectant les cellules connectées en aval (*via* des synapses), ou un circuit électronique composé de transistors, de résistances et de fils. Elle est d'autant plus élevée qu'un système est capable d'influencer, à partir de son état actuel, ses propres valeurs d'entrée et de sortie. L'état de ce système est alors marqué par son passé et porteur de son avenir.

Notre théorie stipule que tout mécanisme doté d'un tel pouvoir est conscient. Plus un système a une valeur importante d'information intégrée – représentée par la lettre grecque Φ (prononcée « fi ») –, plus il est conscient. En revanche, s'il n'a aucun pouvoir causal intrinsèque, son Φ est nul et il ne ressent rien.

Au sein du cortex, la quantité d'information intégrée est énorme, car on y trouve un vaste réseau de neurones hétérogènes et étroitement interconnectés (qui s'influencent donc mutuellement). La théorie a inspiré la construction d'un appareil de mesure de la conscience, en cours d'évaluation clinique (*voir la photo page 46*). Cet instrument serait précieux pour déterminer si certains patients sont conscients mais incapables de communiquer, ou totalement inconscients – par exemple dans les états végétatifs persistants, l'anesthésie et le *locked-in syndrome*.

Pour les ordinateurs programmables, en revanche, la situation est différente, comme l'ont montré des travaux qui ont analysé leur structure à l'échelle des composants métalliques – les transistors, fils et diodes qui servent de substrat physique à tout calcul. Leur pouvoir causal intrinsèque et leur Φ sont infimes, notamment parce que leur connectique est très différente de celle du cerveau : chaque composant n'est connecté qu'à quelques autres (à où un seul neurone forme, en moyenne, 10000 synapses), et il y a bien moins de rétroactions que dans nos systèmes neuronaux. Cela reste vrai quel que soit le logiciel qui tourne sur le processeur : que ce logiciel calcule les impôts ou simule le cerveau, cela ne change rien.

Dans le film *Ex Machina*, un robot humanoïde nommé Ava s'éveille à la conscience. Un scénario réaliste ?



Ex_Machina © Universal Pictures, 2014 (capture d'écran).

CE QU'ON EST, ET NON CE QU'ON FAIT

Le point clé est que deux réseaux qui effectuent la même opération d'entrée-sortie, mais dont les circuits sont configurés différemment, sont susceptibles de posséder des quantités différentes d'information intégrée. La grandeur Φ peut être très faible pour un circuit et très élevée pour l'autre. Bien qu'ils soient identiques de l'extérieur, l'un des réseaux expérimente quelque chose, tandis que son homologue zombie ne ressent rien. La différence se situe sous le capot, dans le câblage interne. En un mot, la conscience résulte de ce qu'on *est*, et non de ce qu'on *fait*.

La théorie de l'espace de travail neuronal global et la théorie de l'information intégrée

ont certaines conséquences drastiquement opposées. Imaginons par exemple que l'on simule le connectome – le câblage synaptique exact de tout le système nerveux. Les anatomistes ont déjà cartographié les connectomes de quelques vers. Ils travaillent actuellement sur celui de la drosophile, la petite mouche qui tourne autour des fruits trop mûrs, et prévoient de s'attaquer à la souris au cours de la prochaine décennie. Supposons qu'à l'avenir il soit possible de scanner un cerveau humain entier, avec ses près de 100 milliards de neurones et ses 100 000 milliards de synapses, après la mort de son propriétaire, puis de simuler son fonctionnement sur un ordinateur avancé, peut-être une machine quantique. Si le modèle est suffisamment fidèle, cette simulation se réveillera et se comportera comme un simulacre numérique de la personne décédée. Ainsi elle parlera et accédera à ses souvenirs, à ses envies, à ses peurs et aux autres traits de sa personnalité. Mais sera-t-elle consciente?

Si l'imitation du fonctionnement du cerveau est tout ce qui compte pour créer la conscience, comme c'est postulé par la théorie de l'espace de travail neuronal global, la personne simulée sera consciente, réincarnée dans un ordinateur. Ce qui n'est pas sans rappeler l'un des fantasmes favoris de la science-fiction: télécharger son connectome dans le *cloud* pour continuer à vivre dans l'au-delà numérique...

Mais la théorie de l'information intégrée propose une interprétation radicalement différente de cette situation: le simulacre ressentira la même chose que n'importe quel logiciel basique – c'est-à-dire rien. Il agira comme une personne, mais sans aucun sentiment. Il ne sera qu'une sorte de zombie (sans le moindre goût pour la chair humaine, rassurez-vous).

Selon cette théorie, les pouvoirs causaux intrinsèques du cerveau sont nécessaires pour créer la conscience. Et ils ne peuvent être simulés: ils doivent faire partie intégrante du système physique sous-jacent.

C'est un peu comme si vous simuliez une pluie diluvienne ou un trou noir sur un ordinateur: vous ne risquez ni d'être mouillé ni d'être avalé par une énorme force gravitationnelle. Tout simplement parce qu'une simulation n'a pas le pouvoir causal de condenser la vapeur d'eau ou de courber l'espace-temps.

Il n'y a toutefois rien de magique dans le cerveau humain et, en principe, il serait possible de créer une conscience équivalente à la nôtre en allant au-delà d'une simple simulation. Il faudrait alors construire du matériel dit «neuromorphe», fondé sur une architecture similaire à celle du système nerveux.

L'éventuel ressenti d'un connectome simulé n'est pas la seule différence entre les deux théories. Celles-ci ne localisent pas au même endroit le substrat physique de certaines

Si l'imitation des fonctions cérébrales suffit pour créer la conscience, la simulation numérique d'un cerveau créera une sorte de réincarnation de la personne

BIBLIOGRAPHIE

C. Koch, **The Feeling of Life Itself: Why Consciousness Is Widespread but Can't Be Computed**, MIT Press, 2019.

L. Naccache, **Observer la conscience**, *Pour la Science*, n° 500, pp. 75-80, juin 2019.

C. Koch, **Mesurer la conscience est enfin possible**, *Pour la Science*, n° 483, pp. 26-34, janvier 2018.

S. Dehaene *et al.*, **What is consciousness, and could machines have it?**, *Science*, vol. 358, pp. 486-492, 2017.

expériences conscientes spécifiques – l'épicentre de ce substrat étant à l'arrière du cortex pour l'une, à l'avant pour l'autre. Cette prédiction et d'autres sont actuellement testées dans le cadre d'une collaboration à grande échelle, impliquant six laboratoires aux États-Unis, en Europe et en Chine, et qui vient de recevoir un financement de 4,5 millions d'euros de la fondation Templeton World Charity.

DES SUJETS À PART ENTIÈRE

La question d'une éventuelle sensibilité des machines importe aussi pour des raisons éthiques. Si les ordinateurs font l'expérience de la vie par leurs propres sens, ils cessent d'être un simple moyen mis au service d'un but déterminé par les humains. Ils doivent être respectés pour eux-mêmes.

Selon la théorie de l'espace de travail global, les machines intelligentes pourraient bien passer de simples objets à sujets à part entière – chacune existerait comme un «je», doté de son propre point de vue. Une idée que l'on retrouve dans les séries télévisées *Black Mirror* et *Westworld*. Et lorsque les ordinateurs auront atteint des capacités cognitives rivalisant avec celles de l'humanité, ils feront valoir leurs droits juridiques et politiques – le droit de ne pas être jetés, de ne pas voir leur mémoire effacée, d'éviter la douleur et la dégradation. L'alternative, incarnée par la théorie de l'information intégrée, est qu'aussi perfectionnés soient-ils, les ordinateurs resteront des coquilles vides, semblables à des fantômes. Il leur manquera ce à quoi nous attachons le plus de valeur: le sentiment de la vie elle-même. ■

UN



NE MEURT JAMAIS.

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

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

ARCTIQUE le climat rebat les cartes

P. 52 Diviser pour mieux régner
P. 63 Une réalité mouvante
P. 66 Vers un réchauffement diplomatique ?

Depuis une vingtaine d'années, l'Arctique se réchauffe. Les températures annuelles moyennes de l'air durant les six dernières années y ont battu tous les records depuis 1900, selon le rapport 2019 sur la région réalisé par 81 chercheurs de 12 pays à la demande de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique. Et dans presque toutes les zones de l'océan Arctique sans glace de mer, la température des eaux de surface est en hausse depuis 1982. Du fait de ce réchauffement, qui entraîne la fonte des glaces et le dégel du pergélisol, les paysages terrestres et marins de l'Arctique subissent des changements considérables. Le seul Groenland a perdu environ 3800 milliards de tonnes de glace entre 1992 et 2018 selon une étude récente.

Ces transformations perturbent la vie des peuples autochtones, de la faune et de la flore locales. Mais pas seulement : devant les ressources, les voies maritimes et les positions stratégiques qu'elles pourraient libérer, elles éveillent aussi les convoitises de différents États. L'offre du président américain Donald Trump, en août dernier, d'acheter le Groenland, est emblématique de l'intérêt nouveau pour ces régions. Ce dossier de *Pour la Science* présente un état des lieux de la situation pour mieux comprendre les enjeux géopolitiques qui pèsent sur le sommet du monde.



© Peter Horvath (illustration) ; Getty Images (glace)



L'ESSENTIEL

> Cinq États bordant l'océan Arctique – la Russie, la Norvège, le Danemark, le Canada et les États-Unis – revendiquent des droits sur des portions du fond marin qui se chevauchent.

> Trois d'entre eux déclarent que le pôle Nord leur appartient.

> L'examen des arguments géologiques avancés, long et compliqué, se heurte aux tensions géopolitiques croissantes.

L'AUTEUR



MARK FISCHETTI
rédacteur senior à *Scientific American*, où il couvre tous les aspects de la durabilité

Diviser pour mieux régner

Cinq États revendiquent des droits sur de vastes portions du fond marin de l'océan Arctique. Mais ces territoires se chevauchent...

Le 2 août 2007, à bord d'un mini-sous-marin, deux députés russes sont descendus 4300 mètres sous l'épaisse couche de glace de mer du pôle Nord jusqu'au sombre plancher océanique à l'aplomb. À l'aide d'un bras robotisé, ils ont planté un drapeau national en titane dans les sédiments. «Si dans cent ou mille ans, quelqu'un descend là où nous étions, il verra le drapeau russe», a déclaré le chef d'expédition Artur Chilingarov à un journaliste de l'agence de presse russe Itar-Tass après avoir fait surface devant le brise-glace nucléaire de soutien. Le président Vladimir Poutine lui a téléphoné sur le navire pour lui adresser ses félicitations.

La nouvelle n'a toutefois pas impressionné le géophysicien canadien David Mosher. Lorsqu'il l'a apprise, à son bureau de l'institut océanographique de Bedford, en Nouvelle-Écosse, il a jeté un coup d'œil à un petit cylindre de boue dense et séchée de la taille d'une saucisse qui reposait sur un plateau en plastique, dans son étagère. Il s'agissait d'un petit morceau d'une carotte de sédiments de 13 mètres de long extraite du même endroit en 1991, quand David Mosher était étudiant en thèse à l'université Dalhousie, à Halifax. Avec quarante scientifiques internationaux, il s'y était aventuré sur deux brise-glace de recherche allemands et suédois. Les scientifiques avaient envoyé un carottier à piston au fond de la mer, foré et extrait l'échantillon des sédiments lourds. «Nous n'avons pas >

> planté de drapeau», se moque Mosher. «Nous avons creusé le trou pour que les Russes en plantent un.»

La mise en place du drapeau était une manœuvre politique visant surtout à remonter le moral des Russes, qui souffraient d'une profonde récession. Mais la simple prétention de la Russie pour le pôle Nord a clairement indiqué aux quatre autres États riverains de l'océan Arctique que le moment était venu de revendiquer officiellement toute portion de ses fonds marins qu'ils estimaient leur revenir.

En fait, les revendications avaient déjà commencé. Un an auparavant, la Norvège avait soumis des données géologiques et des cartes délimitant trois plaques de fond marin à la Commission des limites du plateau continental (CLPC), un organe des Nations unies qui examine les requêtes de délimitation des États côtiers et détermine si la science a été correctement appliquée. Le royaume du Danemark, qui comprend le Groenland, a pris plusieurs années supplémentaires pour amasser une énorme quantité de données. En 2014, il a ainsi soutenu, une pile de dossiers à l'appui, qu'il avait des droits sur une vaste portion du plancher océanique de l'Arctique couvrant 900 000 kilomètres carrés. La Russie, qui avait transmis un premier dossier dès 2001, mais fondé sur des données incomplètes, en a soumis une nouvelle version plus détaillée en 2015, où elle revendique 1,3 million de kilomètres carrés – soit deux fois la superficie de la France métropolitaine. Les superficies réclamées par la Russie et le Danemark se chevauchent largement.

En mai dernier, une équipe canadienne dirigée par David Mosher, aujourd'hui professeur de géophysique à l'université du New Hampshire, a soumis à son tour à la CLPC 2100 pages de textes, de coordonnées et de mesures provenant de sonars multifaisceaux, gravimètres et carottes, indiquant que 1,1 million de kilomètres carrés des fonds marins faisaient partie du Canada. L'étendue empiète largement sur celles revendiquées par les Russes et les Danois. Les États-Unis, le cinquième État ayant une côte arctique (le long de l'Alaska), ne présenteront très probablement pas d'argumentaire avant au moins 2022, mais leur parcelle devrait marcher sur celle du Canada.

LA GLACE FOND, LA TENSION MONTE

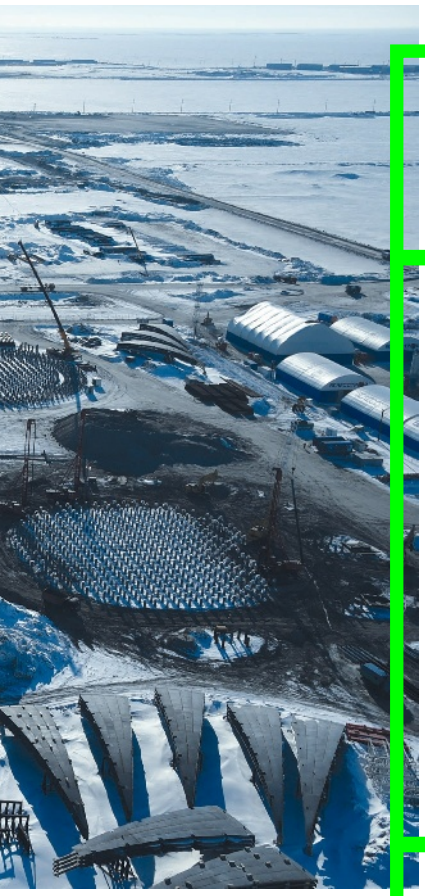
Durant la plus grande partie de l'histoire moderne, les pays ont considéré l'océan Arctique comme une plaque de glace sans grande utilité. Mais la glace a commencé à fondre, offrant de nouvelles perspectives. Dans une étude de 2008, l'institut d'études géologiques des États-Unis a conclu que les sédiments épais de l'Arctique pourraient contenir 30% du gaz naturel et 13% du pétrole qu'il reste à découvrir dans le monde sous forme conventionnelle (l'étude ne prenant pas en compte les ressources non conventionnelles comme les schistes et les sables bitumineux: on estime aujourd'hui que l'Arctique contiendrait environ un quart des hydrocarbures mondiaux encore à découvrir). Des précieux minéraux de fer et de terres rares y reposeraient aussi. Le retrait de la glace de mer a permis d'ouvrir et d'exploiter des routes de navigation. Un avenir prospère s'ouvrant ainsi à eux, chacun des cinq pays s'est inquiété des délimitations de son territoire. «On ne sait jamais ce qui va se passer», déclare Flemming Getreuer Christiansen, directeur adjoint de la Commission géologique du Danemark et du Groenland.

Le traitement de ces demandes pourrait prendre des décennies. La CLPC avance lentement, en partie parce qu'elle gère plus de quatre-vingts dossiers sur de telles demandes dans le monde, du Nicaragua au Vietnam en passant par le Ghana. La fin de l'évaluation des requêtes du Danemark ou de la Russie n'est pas attendue avant plusieurs années. Et le cas canadien ne se conclura que des années plus tard. De plus, la Commission ne statue pas sur les chevauchements des territoires



Dans le port de Sabetta, sur la côte arctique de la Russie, le complexe russe Yamal LNG, financé en partie par la Chine et la France, construit des réservoirs de stockage pour le gaz naturel liquéfié extrait dans la région. Les pays riverains de l'océan Arctique sont de plus en plus désireux d'explorer les fonds marins à la recherche de gaz et de pétrole, et les pays plus éloignés y recherchent des possibilités d'investissement lucratif.

© Kirill Kudryavtsev / Getty Images



revendiqués, de sorte qu'une fois tous les examens terminés, si les pays souhaitent délimiter clairement leurs territoires, ils devront entamer des procédures diplomatiques, mettre sur la table les décisions de la CLPC et négocier les frontières – une autre étape qui pourrait durer longtemps.

Le processus de cartographie et de soumission a toujours été courtois, voire coopératif, enraciné dans la géologie. Mais l'extrême lenteur du processus est problématique. Tandis que les scientifiques examinent méthodiquement les revendications des différents pays, Vladimir Poutine agrandit ses bases militaires sur le long littoral arctique de la Russie. Ses discours et ses actions suggèrent que, pour lui, son pays devrait diriger la région polaire. Pendant ce temps, les pays de l'Organisation du traité de l'Atlantique nord (Otan) renforcent leurs armées au nord, afin que la Russie ne dispose pas seule du savoir-faire opérationnel en zone arctique et pour éviter qu'elle ne puisse projeter sa marine et son armée de l'air de l'Arctique vers l'Europe et le continent américain. La Chine, quant à elle, envoie des navires au nord pour signaler qu'elle aussi veut jouer un rôle.

Par ailleurs, si historiquement les États-Unis n'ont accordé que peu d'attention à la région, à présent, ils font jouer leur autorité. En mai 2019, en Finlande, lors de la 11e réunion ministérielle du conseil de l'Arctique – un forum intergouvernemental –, le secrétaire d'État américain Mike Pompeo a déclaré que la Russie agissait de façon agressive et qu'il fallait surveiller de près la Chine. Pour la première fois en vingt-trois ans, la réunion s'est terminée sans que les participants signent une déclaration de coopération. Les dirigeants auront-ils la patience d'attendre les résultats scientifiques?

OÙ S'ARRÊTE UN PLATEAU CONTINENTAL?

Pendant des siècles, les États-nations ont considéré que les océans n'appartenaient à personne. Dans les années 1600, s'appuyant sur la plus longue distance d'un tir de canon, ils ont commencé à revendiquer des droits sur les trois premiers milles marins (4,8 kilomètres).

Cette pratique s'est maintenue jusqu'au XXe siècle, lorsque les pays se sont mis à s'arroger unilatéralement des droits à diverses distances, menaçant ainsi le concept de liberté de la haute mer établi depuis longtemps. En 1982, pour fixer des règles, plus de 160 pays ont signé la convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM). Elle stipule qu'un État bordant l'un des océans de la planète possède une zone économique exclusive, ou ZEE, qui s'étend à 200 milles marins (370,4 kilomètres) au large de son littoral. L'État a alors tous les droits sur les ressources marines et sous-marines de cette zone. Au-delà de cette ligne se situent les eaux internationales – libres et n'appartenant à personne.

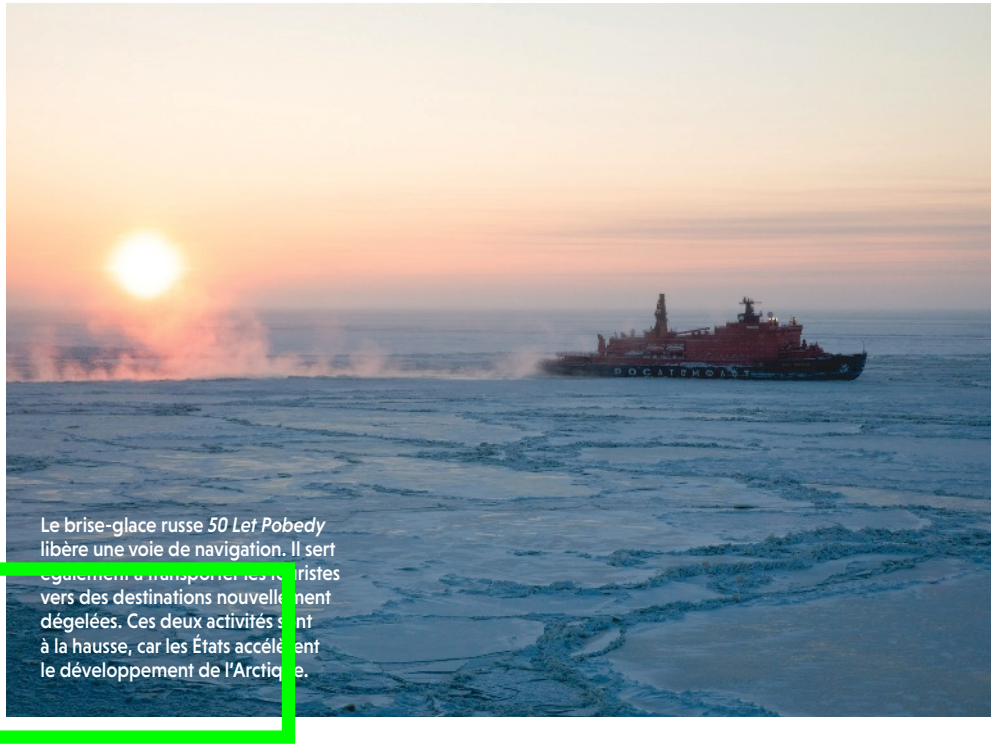
La convention a laissé une porte ouverte. L'article 76 énonce qu'un État peut établir des droits souverains d'exploitation des fonds marins au-delà de 200 milles marins s'il est capable de présenter des preuves géologiques détaillées prouvant que son plateau continental – le plancher océanique en pente douce qui se prolonge du rivage jusque loin dans l'océan avant de plonger dans la mer profonde – s'étend au-delà de la ligne des 200 milles marins. Dans ce cas, un pays aurait des droits exclusifs sur les ressources situées sur et sous le fond marin, mais pas dans la colonne d'eau située au-dessus (la pêche et la navigation resteraient ouvertes). Les pays de l'Arctique n'ont pas porté une grande attention à cette disposition, jusqu'à ce que la glace de mer commence à reculer.

L'article 76 présente les règles qu'un État doit suivre pour délimiter la bordure extérieure d'un plateau continental étendu. Il décrit deux formules pour tracer les limites aussi loin que le permettent les preuves géologiques. Puis il donne deux autres formules qui limitent ces lignes, afin qu'un pays ne puisse revendiquer une portion aberrante d'un quelconque océan.

Les deux formules pour tracer les lignes sont fondées sur un contour nommé «pied du talus». Imaginez-vous debout sur le rivage, regardant la mer. Le fond marin s'enfonce progressivement sur de nombreux kilomètres, puis plonge selon une pente plus raide jusqu'à un plancher océanique beaucoup plus profond, en haute mer. À la base de cette pente, les scientifiques doivent déterminer le pied du talus – l'endroit où la variation de la pente est maximale –, et ce tout le long de leurs côtes et autour de leurs îles. «C'est là – dans la preuve que le pied du talus déterminé est pertinent – que la science intervient», explique David Mosher.

L'océan Arctique ressemble à une tarte bordée de ses cinq États riverains. Lorsque ces pays projettent leurs plateaux continentaux vers le centre de la tarte, ces derniers se chevauchent: ils se terminent là où la tectonique des plaques les a menés. Ainsi, l'application des formules >

L'Arctique contiendrait un quart des hydrocarbures encore à découvrir



Le brise-glace russe *50 Let Pobedy* libère une voie de navigation. Il sert également à transporter les touristes vers des destinations nouvellement dégelées. Ces deux activités sont à la hausse, car les États accélèrent le développement de l'Arctique.

> entraîne parfois de modestes chevauchements. Mais une autre disposition de l'article 76 crée un problème plus vaste. Elle indique qu'un pays peut revendiquer une large bande de fond marin le long d'une dorsale océanique – une chaîne de montagne sous-marine – qui s'étend à partir de son plateau continental, et ce quelle que soit la longueur de cette dorsale. Or elle n'explicite pas le terme «dorsale». Le langage «est totalement ambigu», dit Larry Mayer, directeur du centre pour la cartographie côtière et océanique de l'université du New Hampshire. Professeur à l'université Dalhousie pendant dix ans, où il a notamment dirigé la thèse de David Mosher, Larry Mayer est considéré comme la principale autorité américaine sur le fond marin arctique.

LE CASSE-TÊTE DE LOMONOSSOV

Cette ambiguïté permet aux géologues et aux juristes des différents pays d'interpréter différemment les données sur les dorsales. La dorsale de Lomonossov est celle qui cause le plus grand chevauchement entre le Danemark, la Russie et le Canada. Elle s'étend sur 1800 kilomètres des îles de Nouvelle-Sibérie jusqu'à l'île canadienne d'Ellesmere, juste à côté du Groenland, et divise l'océan Arctique en deux. Certains de ses sommets s'élèvent à 3500 mètres des fonds marins. La dorsale est une gigantesque relique datant de millions d'années, lorsque les continents d'Amérique du Nord et d'Eurasie, alors voisins, ont commencé à s'éloigner en pivotant l'un par rapport à l'autre, déformant le plancher de l'océan Arctique en expansion. Cet héritage commun signifie que le Danemark, la Russie et le Canada peuvent tous trois prétendre que la dorsale s'étend à partir de leurs plateaux continentaux et tracer le contour d'un territoire le long de cette dorsale pour se l'approprier. L'endroit le plus remarquable inscrit dans ces contours? Le pôle Nord.

Les scientifiques disent qu'ils ne font qu'exposer où la géologie les mène. Mais leurs équipes chargées de formuler la requête peuvent aussi mettre la science au service de certaines stratégies nationales. En suivant la dorsale de Lomonossov, la Russie aurait pu prolonger son plateau continental étendu jusqu'à la ZEE du Canada, mais dans sa requête à la CLPC, elle s'est arrêtée juste après le pôle Nord. En 2001 comme en 2015, la Russie s'est engagée à ne pas revendiquer le plateau continental au-delà du pôle Nord, en respectant la «logique des secteurs», qui respecte l'idée de secteurs nationaux allant au maximum jusqu'au pôle, comme des sortes de parts de pizza.

Selon Rick Saltus, un géophysicien de l'université du Colorado à Boulder, qui participe depuis longtemps aux travaux américains, la Russie n'a peut-être aussi pas eu assez de données près de l'extrémité canadienne de la dorsale; la production des détails que la CLPC recherche coûte cher. Ou alors elle s'est arrêtée là où cela l'arrangeait d'un point de vue stratégique. Pourquoi compliquer les futures négociations frontalières avec le Danemark et le Canada?

Le Canada a adopté une approche semblable, s'arrêtant lui aussi juste au-delà du pôle Nord et chevauchant les contours de la Russie.

© Alexander Ryumin / Getty Images



La fonte des calottes glaciaires dans des régions comme le Svalbard (ci-dessus) et le Groenland expose des rivages qui peuvent être aménagés, tandis que le recul de la glace de mer donne accès au plancher océanique et à de voies de navigation exploitables pendant une plus grande partie de l'année

dans cette région. Le Danemark, en revanche, revendique la dorsale du Groenland jusqu'à la ZEE de la Russie. « Nous ne nous demandons pas si d'autres États auraient des droits sur la même zone », déclare Finn Mørk, géophysicien de la Commission géologique du Danemark et du Groenland, et chef de l'équipe scientifique danoise. Pour lui, c'est aux négociateurs de résoudre les problèmes de chevauchement – et de déterminer qui, finalement, peut agiter un drapeau au pôle Nord.

LA POSITION DÉLICATE DES ÉTATS-UNIS

Compte tenu de l'imprécision de l'article 76, les trois déclarations relatives à la dorsale de Lomonossov pourraient toutes être légitimes sur le plan scientifique. Mais ce ne sont pas les scientifiques qui déterminent quel État obtient les droits sur quel territoire. Cette décision appartient aux diplomates. Et la tension géopolitique croissante pourrait prendre le pas sur le processus ordonné, fondé sur la science.

Tout d'abord, la revendication que les États-Unis soumettront à la CLPC ajoutera des chevauchements, ce qui compliquera les négociations. Selon Evan Bloom, directeur des affaires maritimes et polaires au ministère américain des Affaires étrangères et président du comité exécutif du projet américain de Plateau continental étendu, l'ampleur du chevauchement ne sera révélée qu'une fois les documents remis, soit en 2022 au plus tôt. Pour Larry Mayer, les États-Unis ont toutes les données dont ils ont besoin. « L'analyse est juste un processus monumental », explique-t-il.

Toutefois, les États-Unis se trouvent peut-être dans la position la plus délicate pour négocier, car ils n'ont jamais signé la convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM), contrairement aux quatre autres pays riverains de l'océan Arctique. De nombreux responsables américains et plusieurs présidents ont recommandé de la signer, mais une poignée de sénateurs méfiants ont empêché sa ratification. Cela pourrait à présent nuire à la cause même du pays. « J'aimerais que les États-Unis sachent à quel point ils sont désavantagés de ne pas avoir signé la convention », commente Galo Carrera, océanographe de l'université Dalhousie, consul honoraire du Mexique au Canada et ancien président de la CLPC.

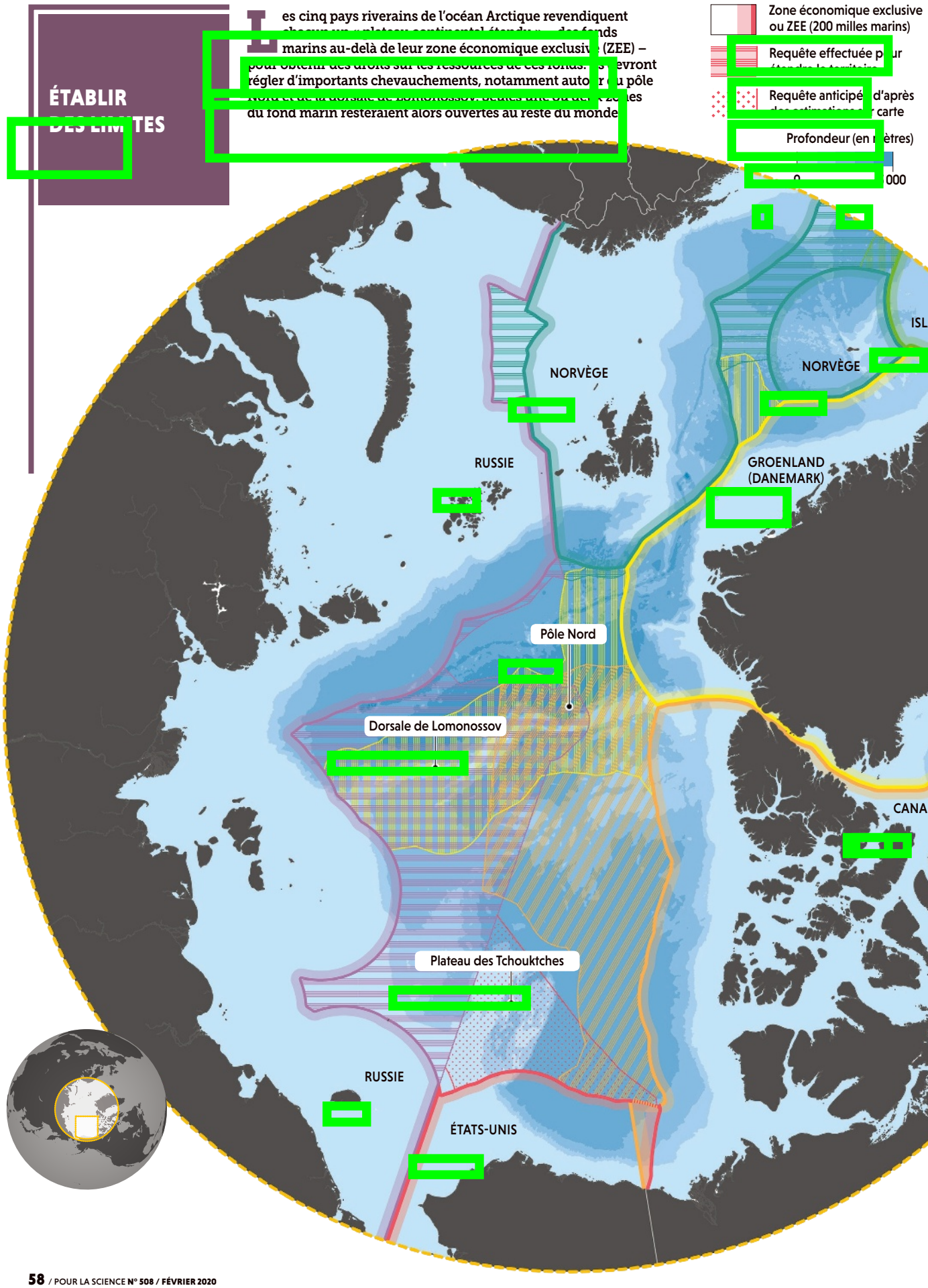
Par conséquent, les États-Unis n'ont pas besoin de présenter une demande à la CLPC ni de se conformer à son examen. Mais Evan Bloom a bon espoir qu'ils feront les deux. Ils ont dépensé 89 millions de dollars pour obtenir des données complètes. Ils veulent que le reste du monde voie qu'ils suivent les mêmes critères que les autres. Cela donne au pays « une position très forte » dans les négociations futures. Et, de fait, il n'existe aucun autre moyen de revendiquer un territoire. Le gouvernement fédéral américain pourrait publier un document déclarant que « cette zone des fonds marins est à nous », mais le monde ne la reconnaîtrait pas. Dans une négociation de frontière, explique Rick Saltus, un pays « ne peut se passer de la décision de la CLPC ». Et, en réalité, les États-Unis reconnaissent la CNUDM en tant que droit international coutumier – la pratique juridique que le monde a adoptée.

>

© Michael Nolan / Getty Images

ÉTABLIR DES LIMITES

Les cinq pays riverains de l'océan Arctique revendiquent chacun un « plateau continental étendu » des fonds marins au-delà de leur zone économique exclusive (ZEE) – pour obtenir des droits sur les ressources de ces fonds. Ils devront régler d'importants chevauchements, notamment autour du pôle Nord et de la dorsale de Lomonossov. Seules une fois ces zones du fond marin resteraient alors ouvertes au reste du monde.



COMMENT LES ÉTATS PRÉPARENT LEURS REQUÊTES

Un État soumet à la commission des documents délimitant la bordure de son plateau continental et du talus. Il utilise l'une des formules A à D pour étendre le plateau aussi loin qu'elles le permettent à partir du pied du talus. Cette ligne est ensuite contrainte par la moins restrictive des formules C et D.

Rivage
Plateau continental
Talus continental
Pied du talus (variation maximale de la pente)
Croûte
Roche sédimentaire

Formules pour délimiter la bordure

A Une ligne à 60 milles marins du pied du talus

60 milles marins

Pied du talus

B Une ligne où l'épaisseur de la roche sédimentaire vaut moins de 1 % de la plus petite distance au pied du talus

Limites de la bordure

C Une ligne à 350 milles marins du rivage

350 milles marins

D Une ligne à 100 milles marins du talus à une profondeur de 2 500 mètres

Profondeur de 2 500 mètres

100 milles marins

Bordure finale du plateau continental étendu

La formule A va le plus loin

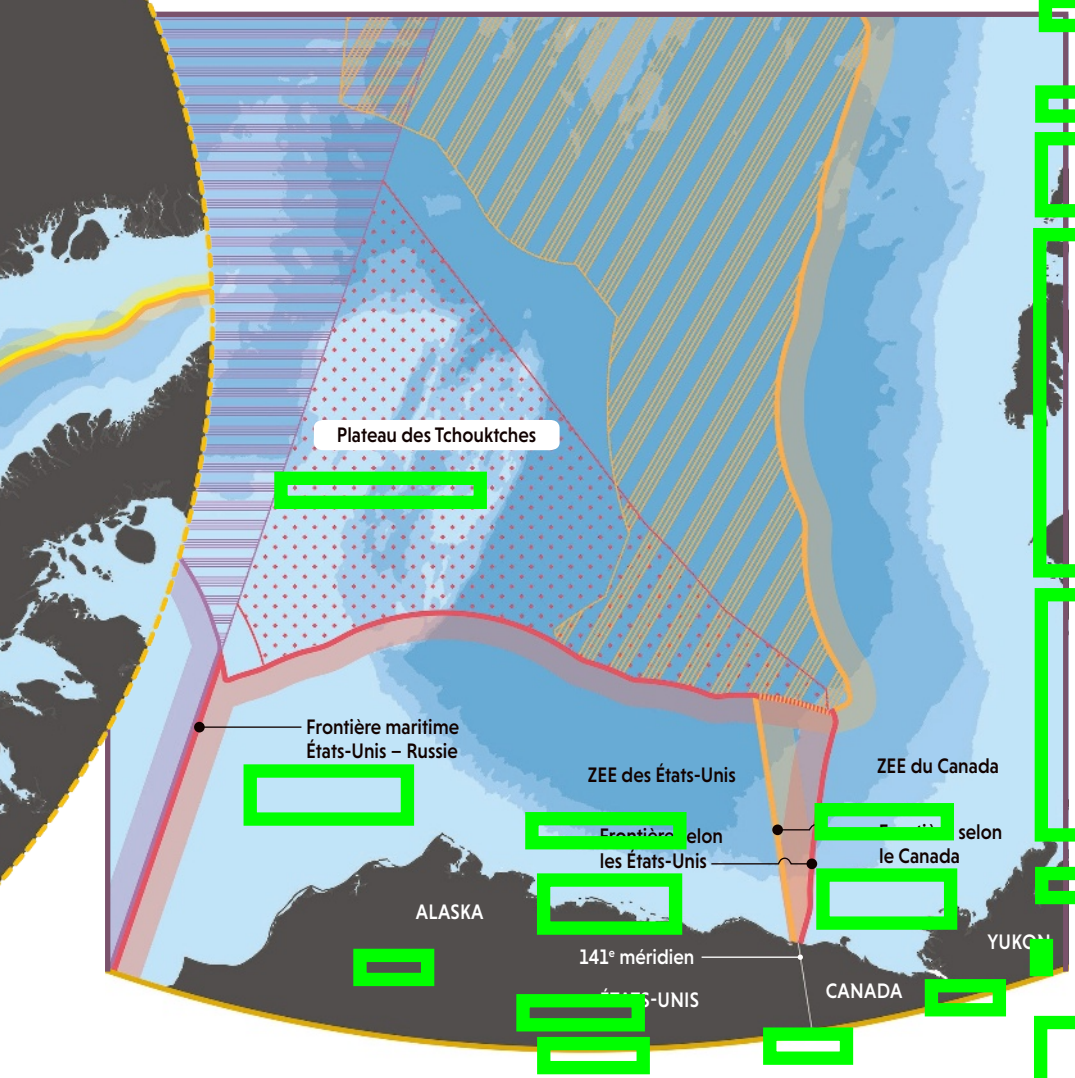
Les limites se chevauchent pas

La formule B va le plus loin

La limite C est la moins restrictive

La limite D est la moins restrictive

Rivage Plaque Talus



LE DILEMME TCHOUKTCHE

Accorder les revendications du fond marin implique des compromis politiques et scientifiques.

Un plateau flexible

La Russie et les États-Unis pourraient tous deux dire que le plateau des Tchouktches est un « prolongement naturel » de leur plateau continental, selon la façon dont les experts interprètent la séparation des continents. Mais en 1990, l'ex-Union soviétique et les États-Unis ont négocié une frontière maritime entre leurs ZEE ; la Russie est donc partie de cette frontière dans sa requête sans la franchir. Les États-Unis affirment qu'ils la respecteront aussi.

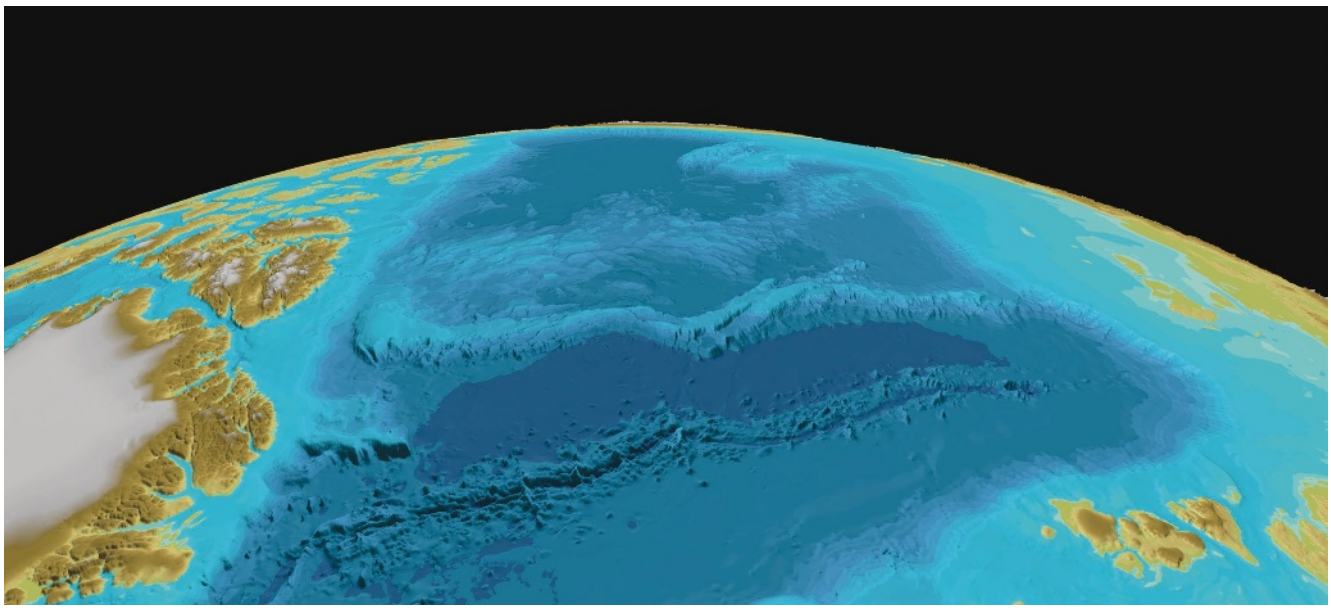
Une impasse économique

Les États-Unis et le Canada sont en désaccord sur la frontière de leurs ZEE. Le Canada prolonge la frontière terrestre du 141e méridien *(ligne orange)* ; les États-Unis tracent une ligne équidistante des côtes sinueuses *(en rouge)*. Entre les deux, le fond marin recélerait environ 1,7 milliard de mètres cubes de gaz naturel.

Profondeur (en mètres)

0 2 000 4 000

© Katie Peek (cartes) / sources : IBRU, université Durham et CNUDM (zones revendiquées) ; [illegible] (ZEE) ; GEBCO (lignes de côte) ; IBCAO version 3.0 (profondeurs des fonds marins)



La dorsale de Lomonossov *(bande blanche au centre)* s'étend sur le plancher océanique de l'Arctique depuis le Canada et le Groenland (qui fait partie du Danemark) *(à gauche)* jusqu'à la Russie *(à droite)*.

> Ensuite, la rhétorique américaine complique aussi la situation politique dans la zone arctique. En juin 2019, le ministère américain de la Défense a publié sa dernière stratégie pour cette région, où il stipule que bien qu'il y ait eu énormément de coopération entre les pays de l'Arctique, il entrevoit à présent une «ère de compétition stratégique» et «une voie possible pour [...] l'agressivité».

UNE POSITION MILITAIRE STRATÉGIQUE POUR LA RUSSIE

Or les actions de la Russie pourraient être interprétées dans ce sens. Depuis que le pays a pris d'assaut l'Ukraine, «les relations entre l'Otan et la Russie sont tendues», explique Rob Huebert, professeur de sciences politiques à l'université de Calgary, au Canada, et ancien directeur adjoint du Centre d'études militaires, de sécurité et stratégiques de l'université. La côte arctique offre à la Russie une position militaire stratégique, notamment en termes de dissuasion nucléaire, car elle abrite d'importantes bases nucléaires sous-marines. «On ne peut pas séparer la politique de l'Arctique de la géopolitique plus vaste» du monde, constate Rob Huebert. Pour lui, Vladimir Poutine «considère l'expansion de l'Otan comme une menace majeure et il ne permettra pas que cela se produise». En mars 2019, la Suède a accueilli un exercice militaire d'envergure, avec des milliers de soldats de l'Otan dans sa région la plus septentrionale. Le même mois, en raison de la montée en puissance de la Russie dans l'Arctique, le général américain Curtis Scaparrotti a déclaré au Sénat que l'armée américaine devrait également s'impliquer davantage dans le Nord.

Au-delà du pétrole, du gaz et de la stratégie militaire, la Russie a peut-être une autre raison de vouloir contrôler de vastes étendues des mers arctiques. «C'est une question de nationalisme», affirme Andrew Holland, directeur des opérations de l'American Security Project, une organisation non partisane qui réfléchit aux stratégies de sécurité des États-Unis pour le XXIe siècle. Pour lui, cela signifie: «Nous sommes les Russes. Nous sommes la puissance arctique et nous devrions avoir des droits sur tout cela.»

D'autres experts géopolitiques pensent que l'on surestime le potentiel conflictuel de l'Arctique. Heather Exner-Pirot, chercheuse au Centre de recherche interuniversitaire sur les relations internationales du Canada et du Québec et rédactrice en chef de l'*Arctic Yearbook*, une publication en ligne qui analyse chaque année la situation géopolitique de l'Arctique, est en désaccord avec Rob Huebert, son ancien directeur de thèse: «Les gens pensent qu'il y a de la compétition dans l'Arctique, mais il s'agit en réalité d'un oligopole de cinq États ayant le monopole de l'océan Arctique. Ils sont ravis.»

LES OMBRES DE LA CHINE ET DU GROENLAND

Les cinq pays riverains de l'océan Arctique ont codifié cette situation en 2008, quand ils ont signé la déclaration d'Ilulissat, un accord qui stipule que chaque pays collaborera pour protéger le trafic maritime, prévenir les déversements de pétrole et résoudre pacifiquement les différends. L'accord dit aussi que les pays bloqueront toute tentative internationale plus vaste de gouverner l'Arctique, ainsi que tout autre État qui tenterait de forer des puits de pétrole ou de gaz sans permission. Aucun autre pays, ni aucun peuple autochtone de l'Arctique n'a pris part à ce texte.

Si les querelles entre les cinq États ne compromettent pas le traitement des revendications par la CLPC, deux autres acteurs pourraient

© Martin Jakobsson / Science Source

parvenir. La Chine, aux ambitions économiques grandissantes, est l'un d'eux. En 2013, le président Xi Jinping a dévoilé son projet de nouvelle route de la soie – l'Initiative route et ceinture –, dont l'objectif est de créer un réseau économique entre de nombreux pays en y construisant des infrastructures étendues. Dans plus de soixante pays, la Chine est ainsi à la tête de projets de centaines de milliards de dollars. Certains dirigeants du monde se demandent si le véritable plan de la Chine ne serait pas de commander une énorme alliance à travers toute l'Asie.

Une partie de l'initiative, connue sous le nom de Route de la soie polaire, vise à développer les routes maritimes chinoises à travers l'Arctique et les accords commerciaux avec les pays situés le long de ces corridors. En 2017, Xi Jinping a rencontré individuellement les présidents des pays arctiques.

Le second acteur est le Groenland, territoire du Danemark depuis 1721. Bien que le Danemark ait accordé au Groenland une autonomie renforcée en 2009, les élections de 2018 sur le territoire ont sonné comme un référendum en faveur de l'indépendance totale. Le seul obstacle à la sécession est l'absence d'un modèle économique qui permettrait au Groenland de survivre. Mais à mesure que la glace et la neige se retirent, la Chine investit dans l'exploitation minière locale. Et d'autres pays, dont les États-Unis, font de même. Aussi les Groenlandais pensent-ils qu'ils pourraient se débrouiller seuls. D'autant que le Danemark a déjà donné au Groenland, en 2009, les droits sur toutes les ressources naturelles dans la ZEE autour de l'île.

En devenant un État indépendant, le Groenland resterait automatiquement dans l'Otan. Mais il pourrait demander à en sortir et s'associer à la Chine, voire à la Russie, pour développer les environs en cours de dégel. Par ailleurs, avec son indépendance, le Danemark lui céderait les revendications sur le plateau continental étendu cartographié à partir des côtes de l'île et quitterait donc la table des négociations.

L'ARCTIQUE, UN BIEN COMMUN ?

Si les responsables scientifiques des cinq pays riverains de l'Arctique n'ont pas voulu se prononcer sur les négociations futures des frontières, le rythme du processus de la CLPC en met certains mal à l'aise. Neuf d'entre eux – dont David Mosher pour le Canada, Larry Mayer et Rick Saltus pour les États-Unis, Finn Mørk pour le Danemark, et Eugene Petrov et Yuri Firsov pour la Russie – travaillent à établir une «base du talus» commune à tout l'océan Arctique. La base du talus est la zone où le plateau continental atteint le fond marin. On l'identifie à l'aide des données géophysiques et géologiques de la région, puis c'est dans cette zone que l'on calcule le pied du talus, l'endroit où la rupture de pente est la plus marquée. Disposer d'une base du talus commune pour tout l'Arctique signifierait que les pays ont tous calculé leur pied du talus de la même manière. Une telle entente permettrait peut-être à la CLPC d'accélérer ses examens.

Si la CLPC approuvait les requêtes des cinq pays en l'état, la partie non revendiquée des fonds marins de l'océan Arctique serait probablement infime – elle se résumerait peut-être à deux modestes parcelles au large des côtes, selon Rick Saltus. Cette solution, cependant, pourrait ne pas satisfaire le reste du monde. Parfois, les pays riverains de l'océan Arctique pensent qu'il est leur arrière-cour, explique Galo Carrera, mais nombre d'autres États ainsi que les peuples autochtones, le considèrent comme un bien commun mondial. Ils estiment qu'ils ont le droit de l'explorer et d'y rechercher des ressources. De fait, de telles exploitations sont juridiquement possibles et relèveraient de l'Autorité internationale des fonds marins, un organisme intergouvernemental autonome sous l'égide des Nations unies chargé de réglementer l'exploitation minière des fonds marins.

> **Nombre d'États considèrent l'Arctique comme un bien commun mondial**

Pour certains, le monde devrait même officiellement faire de l'océan Arctique un bien commun. Ils citent le traité sur l'Antarctique comme modèle. En vigueur depuis 1961, ce traité stipule que toutes les terres et les plateformes de glace du continent constituent une réserve scientifique et y interdit toute activité militaire offensive. Il protège également plus de 20 millions de kilomètres carrés de l'océan Austral tout autour. Mais personne ne vit en Antarctique. L'enjeu est plus reculé, plus gelé. On a par ailleurs peu d'informations sur les ressources locales. À l'autre pôle, en revanche, au fur et à mesure que l'Arctique se réchauffera, le foyer autrefois solitaire des peuples autochtones, qui vivaient de sa nature sauvage au lieu d'essayer de la maîtriser, sera morcelé et développé comme le reste du monde. Et que la science ou la politique soient à l'origine de ce changement, il est déjà en cours.

BIBLIOGRAPHIE

A. Piskarev *et al.*, **Geological structures of the Arctic Basin**, Springer, 2019.

Arctic report card : Update for 2019, NOAA, 2019, arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019

Changes in the Arctic: Background and Issues for Congress, CRS Report, 2019, crsreports.congress.gov

M. Mereed, **Les Mondes polaires**, PUL, 2019.

F. Mørk, **Identification of the base of the continental slope on sedimentary fans**, *Ocean Development & International Law*, vol. 47(2), pp. 131-140, 2016.

Site du Conseil de l'Arctique : arctic-council.org

Site de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer : www.un.org/Depts/los

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	28 % de réduction *	**31 %** de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG20STD

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

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

59 € Au lieu de ~~82,80 €~~

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

79 € Au lieu de ~~114,40 €~~

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

99 € Au lieu de ~~174,40 €~~

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

2 / J'indique mes coordonnées

☐ Mme ☐ Mr

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 :

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

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



L'AUTEUR



MARK FISCHETTI
rédacteur senior à *Scientific American*, où il couvre tous les aspects de la durabilité

Une réalité mouvante

Le changement climatique modifie considérablement la vie au sommet du globe.

Sur l'île Banks, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada, plus de 4000 glissements de terrain progressent lentement à mesure que le pergélisol s'affaisse et s'effrite du fait de sa fonte. En Sibérie, à cause du réchauffement du sol, des infiltrations de méthane souterrain créent des brèches en surface et éclatent, laissant des cratères de 40 mètres de large. Dans tout l'Arctique, le changement est devenu la norme, en particulier celui lié à l'évolution des pays et des entreprises. Construction, extraction de pétrole et de gaz naturel, transport maritime et tourisme sont en hausse. Indéniablement, climat et activités humaines laissent des traces dans la nature et sur les millions de personnes vivant dans la région.

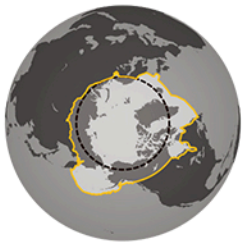
À mesure que les interactions s'étendent, la science sera importante pour éclairer les accords et les politiques, notamment en ce qui concerne la préparation aux catastrophes, la protection de l'environnement, les possibilités économiques, la sécurité alimentaire, la santé humaine et la résilience des collectivités. Les peuples autochtones sont peut-être parmi les experts les plus précieux. Pendant des années, ils ont suivi de près l'évolution des températures et le recul de la couverture de glace, parcouru les montagnes et les forêts, suivi les troupeaux de caribous, pêché dans les mers et maintenu la biodiversité. Leurs communautés et cultures sont aussi les plus touchées.

Certains dirigeants autochtones affirment que l'Arctique devrait être gouverné par des organisations coopératives et des règles qui transcendent les frontières politiques. Par exemple, une planification territoriale du sol et de la mer sur de vastes étendues pourrait établir les droits des personnes et les conditions pour protéger l'environnement, et fournir les moyens pour un dialogue constructif. Selon ces dirigeants, l'utilisation de l'Arctique ne sera durable que si son environnement et sa communauté sont sains. ■

© Peter Horvath (illustration) ; Christoph Wagner / Getty Images (renne) ; Getty Images (neige)

UNE TERRE DE CHANGEMENT

Les scientifiques manquent de mots pour exprimer le changement qui touche les paysages terrestres et marins de l'Arctique. Des facteurs physiques tels que la hausse des températures atmosphérique et marine ou la disparition de la neige et de la glace de mer aggravent la situation. Par conséquent, des organismes aussi variés que des algues, arbres et caribous prospèrent, luttent ou se déplacent ; chaque élément de la chaîne alimentaire doit s'ajuster. Et la fonte du pergélisol pourrait libérer assez de gaz à effet de serre pour doubler le réchauffement climatique qui s'est déjà produit…



LE SOMMET DU GLOBE

Il existe différentes façons de définir l'« Arctique ». Les cartes ci-dessous suivent la délimitation du conseil de l'Arctique.

CHANGEMENTS PHYSIQUES

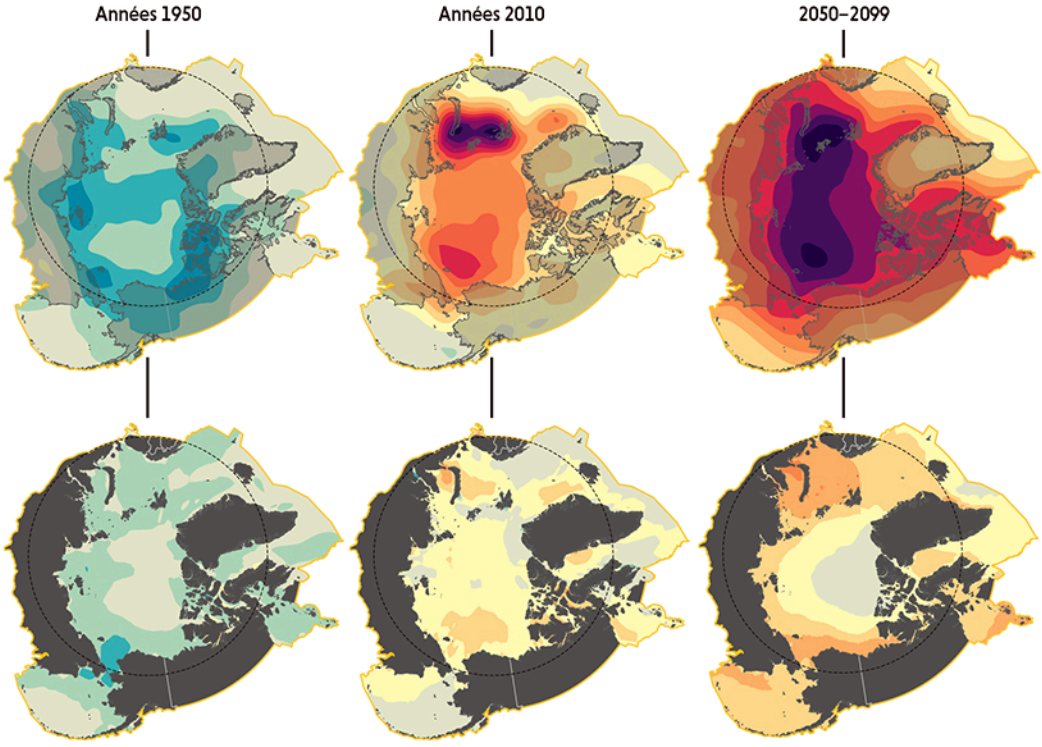
L'air, la mer et le paysage se transforment rapidement. Chaque caractéristique est représentée sur la plus longue période pour laquelle on dispose de données exhaustives.

UN AIR PLUS CHAUD

Dans les années 2010, les températures hivernales moyennes de l'air en surface ont été bien plus élevées que dans les années 1950. La seconde moitié de ce siècle sera plus chaude, selon les projections supposant des émissions moyennes de gaz à effet de serre.

UN RÉCHAUFFEMENT DE L'OCÉAN

Les températures de surface de la mer en été ont considérablement augmenté et devraient continuer à grimper selon les prévisions.



Anomalies de température par rapport à la moyenne sur 1956-2005



LES RÉPONSES DE LA NATURE

Toutes les formes de vie s'ajustent aux conditions changeantes.

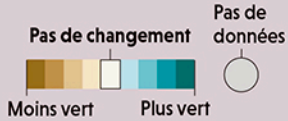
LA TOUNDRA VERDIT

L'analyse de la couverture végétale sur les images satellitaires révèle l'apparition de terres plus vertes ou brunes entre 1982 et 2017.

LES ALGUES SE MULTIPLIENT

Le phytoplancton prospère dans les mers plus chaudes et sans glace. Son expansion, repérée par satellite grâce à sa couleur verte, a été plus importante durant l'été 2017 que 2003.







Castor d'Amérique du Nord

L'EFFET CASTOR

Les castors suivent les arbres qui migrent vers le nord. Ils les abattent et construisent des barrages, causant des inondations locales qui dégèlent le pergélisol, lequel libère du dioxyde de carbone et du méthane. Ces gaz favorisent le réchauffement, qui fait migrer les arbres plus au nord. Plus de castors les suivent, élèvent des barrages et créent des inondations dégelant le sol, et le réchauffement continue d'augmenter.

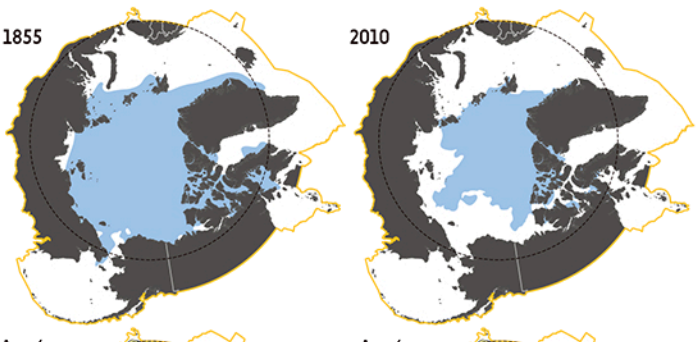
© Katie Peek (cartes); Morgan Trimble / Getty Images (castor); Adrian Wojcik / Getty Images (longyearbyen); sources : ESRL / NOAA (températures de surface de l'air et de la mer) ; NSIDC (glace de mer) ; NCEI / NOAA (couverture neigeuse) ; Merritt R. Turetsky, université de Guelph (pergélisol) ; Uma S. Bhatt, université de l'Alaska de Fairbanks (verdissement de la toundra) ; Karen E. Frey, université Clark (productivité organique primaire) ; ONUAA (habitats des morues) ; State of the Arctic Marine Biodiversity Report, chapitre 3.4 : « Marine fishes », Conservation of Arctic fauna and flora (CAFF), 2017 (Abondance des morues) ; Birdlife International, 2018 (lieux de reproduction des guillemots) ; Arctic Biodiversity Assessment 2013, CAFF, conseil de l'Arctique, 2013 (tendances des guillemots, ours polaires et caribous)

MOINS DE GLACE DE MER

En septembre, la glace de mer atteint un minimum. De nos jours, la quantité annuelle qui disparaît est bien plus importante, comme le montrent les données de 1855 et 2010, années médianes respectives de la décennie 1850-1859 et de la plus récente étudiée.

Étendue de glace en septembre

Glace de mer présente

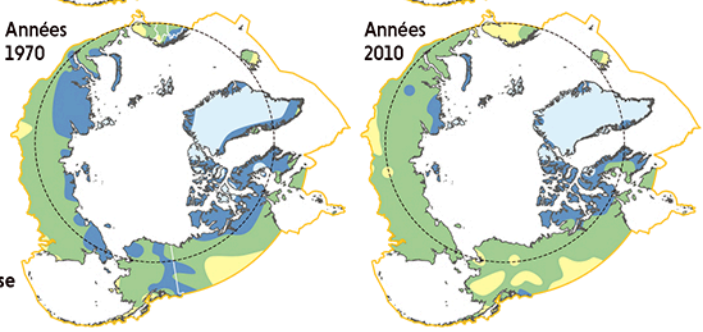


MOINS DE NEIGE

Le nombre de semaines de couverture neigeuse a diminué entre l'hiver 1972-1973 (médian pour les années 1970) et celui de 2008-2009 (médian pour les 11 dernières années).

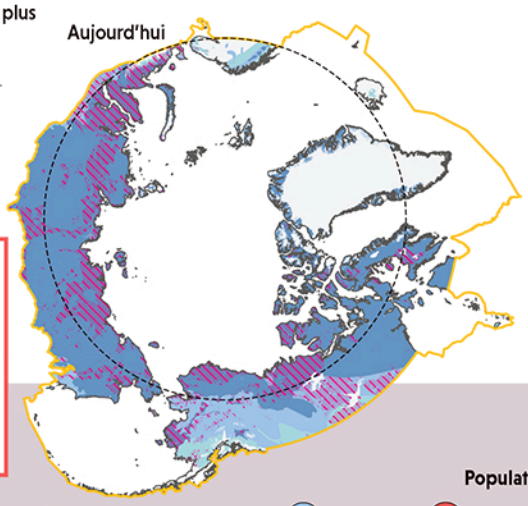
Semaines sans couverture neigeuse

20 — 50 et plus



UN PERGÉLISOL RAMOLLI

Ce sol, auparavant gelé presque toute l'année (voire toute), se dégèle, lentement par endroits, rapidement ailleurs.



Types de pergélisol

- Présent toute l'année
- Discontinu ou dégelé en été
- Couvre moins d'un tiers de la superficie
- Dégèle le plus vite

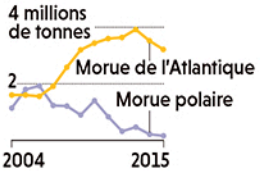
LE SVALBARD : UN POINT CHAUD

L'archipel du Svalbard, en Norvège, change radicalement. Par rapport à 1971, les hivers y sont plus chauds de 7 °C et plus courts de 2 mois. La pluie, autrefois peu fréquente, inonde régulièrement le sol, lequel dégèle et s'affaisse sous le poids des bâtiments. Les pluies, cependant, gèlent parfois les lichens et les mousses, obligeant les rennes à se rabattre sur le varech, moins nutritif, échoué le long des rives dégelées. À l'intérieur des terres, la Réserve mondiale des semences, qui était enfouie dans le sol gelé, perd son réfrigérateur naturel.



Longyearbyen, ville du Svalbard

BIOMASSE DANS LA MER DE BARENTS



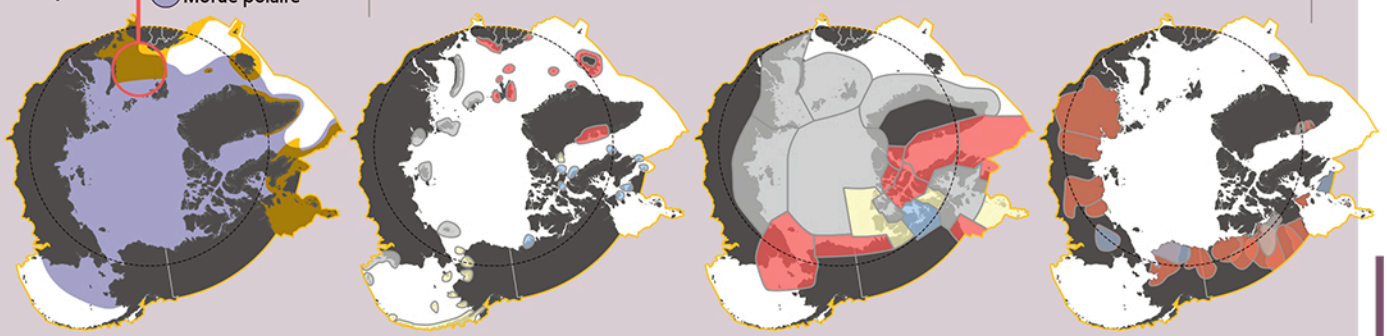
Répartition des poissons

Morue de l'Atlantique

Morue polaire

Population locale

En hausse — En baisse — Stable — Inconnue



LES POISSONS MIGRENT

La morue polaire dépend de la glace de mer pour frayer. À mesure que les océans se réchauffent, ses populations diminuent, tandis que la morue de l'Atlantique arrive du sud.

LES OISEAUX SE DÉPLACENT

Les guillemots de Brünnich nichent dans de vastes colonies côtières et sont des proies importantes pour les humains et les animaux. Leur nombre croît par endroits et diminue à d'autres.

LES OURS POLAIRES MEURENT

Les ours polaires en difficulté sont le symbole de la fonte de l'Arctique. Leur déclin est généralisé.

LES CARIBOUS FLUCTUENT

Sur les 23 troupeaux de caribous suivis, 16 diminuent, 5 augmentent et 2 se maintiennent.

L'ESSENTIEL

> Profitant du dégel, la Russie étend sa présence militaire dans l'Arctique, tandis que l'Otan y organise de grands exercices.

> Ces signes suggèrent que l'agressivité pourrait s'intensifier dans la région.

> Pourtant, le conflit n'est pas inéluctable. Les gouvernements pourraient décider qu'ils ont plus à gagner en coopérant pour développer la région.

L'AUTRICE



KATHRIN STEPHEN
chercheuse en sciences politiques à l'Institut d'études avancées de durabilité, à Potsdam, en Allemagne

Vers un réchauffement diplomatique ?

La tension politique s'accroît dans la zone Arctique, mais la coopération pourrait encore prévaloir.

Le 28 mars 2019, cinq bombardiers américains B-52 effectuaient une mission d'entraînement au-dessus de la mer de Norvège, dans l'océan Arctique. Des avions de combat norvégiens F-16 volaient aussi, dans le cadre d'exercices communs de l'Organisation du traité de l'Atlantique nord (Otan) dans le nord de la Suède, impliquant 10000 soldats. Deux bombardiers russes Tu-160 ont alors pénétré dans le même espace aérien. Surprise, la Norvège a ordonné aux F-16 de suivre les intrus. Les Tu-160 ont poursuivi leur route vers le Royaume-Uni puis ont fait demi-tour, mais leur apparition était inquiétante. Les bombardiers américains et russes sont capables de transporter des armes nucléaires et, moins de deux mois auparavant, les deux pays avaient annoncé qu'ils se retiraient du Traité sur les forces nucléaires à portée intermédiaire parce qu'ils ne souhaitaient plus en respecter les règles. Certes, les avions américains et norvégiens n'avaient pas pénétré dans l'espace aérien russe. Néanmoins, la Russie pourrait avoir interprété leurs exercices comme un avertissement de l'Otan >



© Peter Horvath (illustration) ; Getty images (drapeaux, tanks, glace et eau)



> indiquant que l'organisation était capable de larguer des armes nucléaires près de sa frontière. Peut-être les militaires russes ont-ils jugé nécessaire de rappeler aux alliés qu'ils disposent aussi d'une grande puissance aérienne.

Il est raisonnable de s'inquiéter de la montée des tensions dans l'Arctique. En facilitant l'accès à la région, le réchauffement climatique a placé celle-ci en tête des priorités politiques des huit États dont le territoire terrestre ou marin se trouve au-dessus du cercle arctique: la Russie, la Finlande, la Suède, la Norvège, l'Islande, le Danemark (*via* le Groenland), le Canada et les États-Unis. D'autres acteurs influents comme le Royaume-Uni, le Japon et la Chine accordent aussi plus d'attention aux nouveaux avantages qu'offre le dégel de l'océan Arctique. Celui-ci contiendrait jusqu'à 13% du pétrole et 30% du gaz naturel conventionnels (ou environ un quart des ressources mondiales en hydrocarbures si l'on tient compte des schistes, sables bitumineux, etc.) non encore découverts dans le monde, selon l'institut d'études géologiques des États-Unis. Les différents pays lorgnent également les routes de navigation de plus en plus libres de glace dans le passage du Nord-Est, le long de la côte russe, et dans celui du Nord-Ouest, le long de la côte canadienne, ainsi que de potentielles zones étendues de pêche.

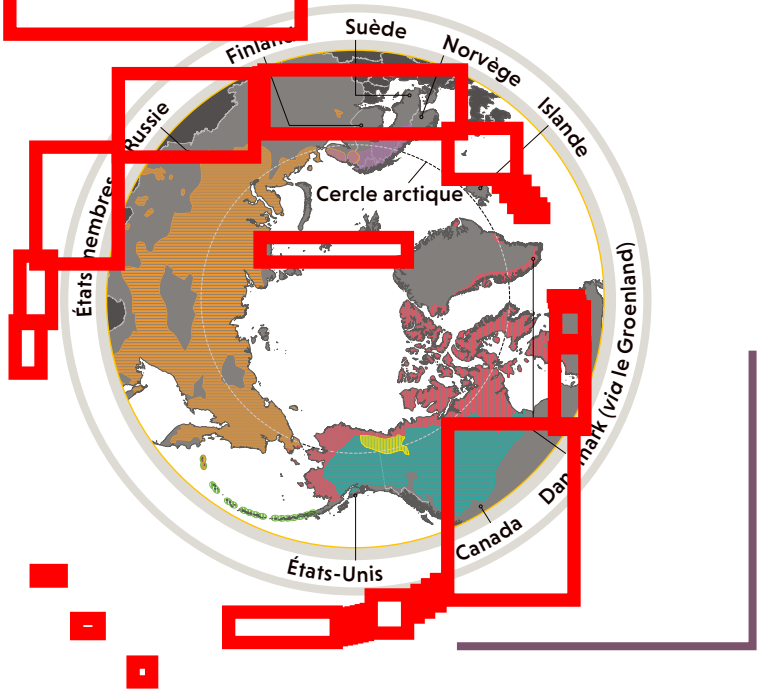
Plus inquiétant encore est le désir apparent de la Russie de dominer la région. Sous la direction du président Vladimir Poutine, le pays a beaucoup investi dans la réouverture des bases militaires et des ports de l'Arctique. Il y établit un réseau de radars de détection de missiles. Et il grossit sa flotte de brise-glace pour assurer tout au long de l'année la manœuvrabilité des navires dans la région. Le premier de ses nouveaux brise-glace LK-60 à propulsion nucléaire, l'*Oural*, a été lancé en mai 2019.

D'autres pays réagissent. Le Royaume-Uni a récemment annoncé une nouvelle stratégie de défense dans la zone arctique. En février 2019, le Congrès américain a alloué 675 millions de dollars à un brise-glace polaire lourd et, en septembre 2019, la marine de guerre américaine a montré que sa seconde flotte était capable de croiser dans les eaux islandaises et d'établir une infrastructure opérationnelle en Islande. Par ailleurs, en avril 2019, la garde côtière des États-Unis a publié une nouvelle stratégie pour l'Arctique qui préconise un investissement accru. Et le mois suivant, lors de la 11e réunion ministérielle du Conseil de l'Arctique, une organisation intergouvernementale coopérative rassemblant des représentants des huit États du cercle arctique et des peuples autochtones, le secrétaire d'État américain Mike Pompeo a vivement critiqué la Russie (et la Chine) pour son comportement agressif dans la région. Ces mesures pourraient refléter un changement de politique visant à mieux contrebalancer l'influence de la Russie dans la zone arctique. Mike Pompeo a même insisté plus sur l'action unilatérale que sur la coopération.

Sur le plan stratégique, l'Arctique est extrêmement important pour la Russie et ses rivaux. La force de dissuasion nucléaire de la Russie est liée à ses sous-marins nucléaires, et ses plus grosses bases sous-marines se trouvent le long de sa côte arctique. Avec ces récentes activités, des craintes d'une nouvelle «guerre froide» dans la région sont apparues. Depuis que la Russie a annexé la péninsule de Crimée en 2014, ses relations avec l'Otan sont particulièrement tendues. En mars 2019, la Russie a annoncé qu'elle renforcerait ses exigences envers les navires étrangers empruntant la route maritime du Nord. Et la navigation russe le long de la route maritime du Nord devrait s'intensifier. Dans le cadre du plan de quinze ans annoncé en décembre 2019, la Russie

LE NORD DES HUMAINS

Sur les 4 millions d'habitants de l'Arctique, environ 500 000 appartiennent [illegible] qui participent au Conseil de l'Arctique, un forum coopératif, aux côtés de ses huit pays membres. L'association des peuples autochtones du Nord, de Sibérie et d'Extrême-Orient de la Fédération de Russie, qui représente [illegible]



© Katie Peek (carte); sources: Philippe Rekacewicz, Unep / Grid-Arendal

prévoit de construire 40 nouveaux navires d'ici à 2035, y compris des brise-glace nucléaires, en vue de développer le trafic russe dans le Nord.

Pour compliquer les choses, quatre des cinq pays riverains de l'Arctique ont présenté aux Nations unies, en vertu de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM), des demandes de droits d'exploitation de leur plateau continental étendu – une prolongation du plateau loin sous l'océan Arctique (*voir l'article page 52*). De vastes zones de chevauchement existent entre les plateaux continentaux étendus revendiqués, en particulier ceux de la Russie, du Danemark et du Canada. La Russie a suivi les procédures de la CNUDM parce qu'elle a beaucoup à gagner avec son très long littoral arctique et son plateau continental peu profond. Mais si les États de l'Arctique ne réussissent pas à se mettre d'accord sur la délimitation des plateaux continentaux étendus, la Russie pourrait décider de ne plus jouer franc-jeu et sa force militaire arctique serait alors prête à agir.

UNE COOPÉRATION INDISPENSABLE

Cependant, le conflit n'est pas inéluctable. Les pays de la zone arctique ont de bonnes raisons de coopérer. Et certains de leurs mouvements ne sont pas aussi agressifs qu'ils le paraissent. Par exemple, les conditions dans l'Arctique sont si difficiles que de nombreuses tâches civiles – comme l'exploration pétrolière ou la surveillance du trafic maritime – ne sont possibles qu'avec du matériel et du personnel militaires.

Les dirigeants russes sont aussi bien conscients que tout conflit ouvert compromettrait l'exploitation du pétrole et du gaz dans la région, car celle-ci dépend fortement des partenaires internationaux, notamment des pays occidentaux et de leurs entreprises. L'extraction des ressources, même sans glace de mer, est coûteuse et difficile. Par exemple, la construction de la station russe de production de gaz naturel liquéfié Yamal LNG, dans la péninsule de Yamal, à l'est de la mer de Kara, a coûté 27 milliards de dollars. La Russie a fait appel à des partenaires français et chinois pour la financer.

Cette dépendance du pays incite à la prudence, en particulier concernant les revendications territoriales. La Russie et la Norvège – les deux États pour lesquels les enjeux sont les plus importants – ont tout intérêt à créer un climat d'investissement stable pour les acteurs extérieurs. C'est exactement ce qu'ils ont cherché à faire en 2010, lorsqu'ils ont réglé leur différend frontalier dans la mer de Barents en quelques semaines, après une impasse qui avait duré de nombreuses années.

À LIRE



M. Mered, *Les Mondes polaires*, PUF, 2019

Fruit de dix ans de travail, ce double dictionnaire stratégique des mondes arctiques et antarctiques propose un état des lieux accessible de la situation scientifique, économique, sociale et politique de ces deux régions, agrémenté de 35 cartes et 32 fiches sur les pays impliqués. Un chapitre fait notamment le point sur la réalité des ressources estimées dans l'Arctique.

Le pétrole et le gaz pourraient même ne pas fournir assez de prise pour déclencher un conflit. La Russie et la Norvège ont un intérêt notable à exploiter ces ressources, qui constituent une part substantielle de leurs revenus d'exportation. Les États-Unis et le Canada, eux, possèdent des gisements de combustibles fossiles beaucoup plus importants et bien plus accessibles dans des régions non arctiques, comme du pétrole dans le golfe du Mexique, du gaz de schiste dans divers États américains et des sables bitumineux en Alberta.

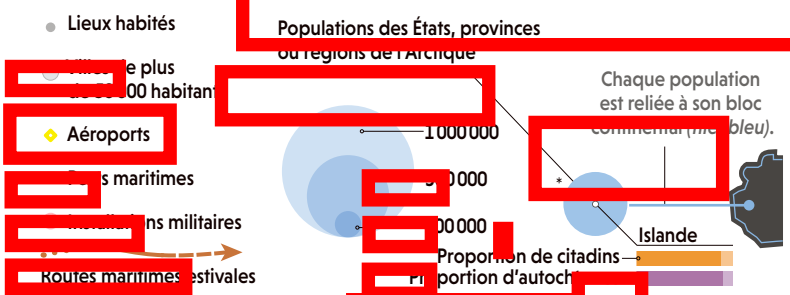
De plus, la majorité des ressources pétrolières et gazières attendues se trouvent dans chacune des cinq zones économiques exclusives (ZEE) des pays riverains de l'océan Arctique, qui s'étendent à 200 milles marins (370,4 kilomètres) des côtes. Or, comme le stipule la CNUDM, chaque pays a le contrôle de ses ressources à l'intérieur de sa ZEE. Certes, on s'attend à trouver quelques gisements de pétrole et de gaz (moins de 5 % des ressources estimées de la région) plus loin sur le plateau continental étendu, là où les revendications se chevauchent, mais comme les règles de la CNUDM devraient appuyer de vastes régions des revendications de la Russie, il y a peu de raisons de penser que ses dirigeants torpilleront la résolution pacifique des désaccords liés aux chevauchements.

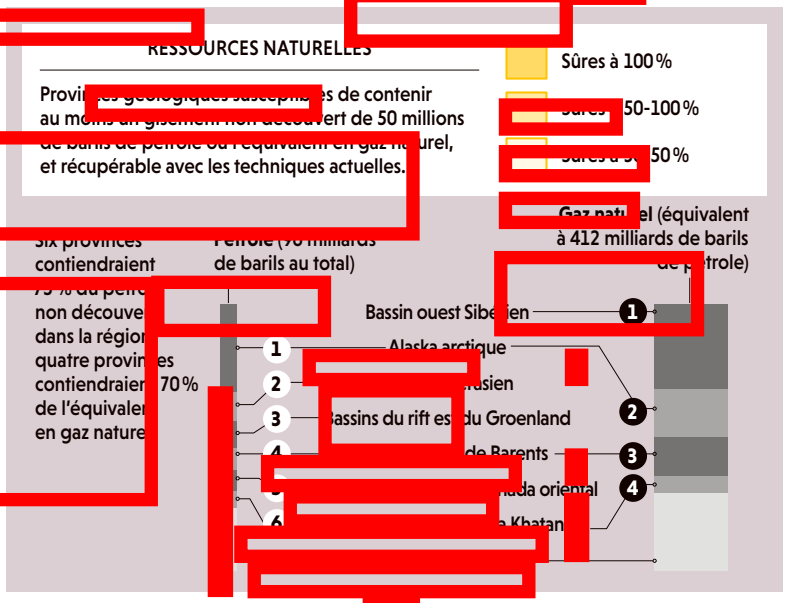
Surtout, les ressources de l'Arctique doivent être rentables pour être exploitées. Le pétrole à 80 dollars le baril – un prix jamais atteint depuis octobre 2014 – pourrait justifier de forer certains gisements en mer, mais sûrement pas ceux, éloignés, du plateau continental étendu. Le sort du gisement de gaz de Chtokman, à l'intérieur de la ZEE russe dans la mer de Barents, en est un exemple. Découvert en 1988, c'est l'un des plus grands gisements au monde, avec un volume de gaz estimé à 3800 milliards de mètres cubes. Au début des années 2000, Vladimir Poutine a affirmé à plusieurs reprises que la Russie développerait ce gisement. Mais ce projet a >

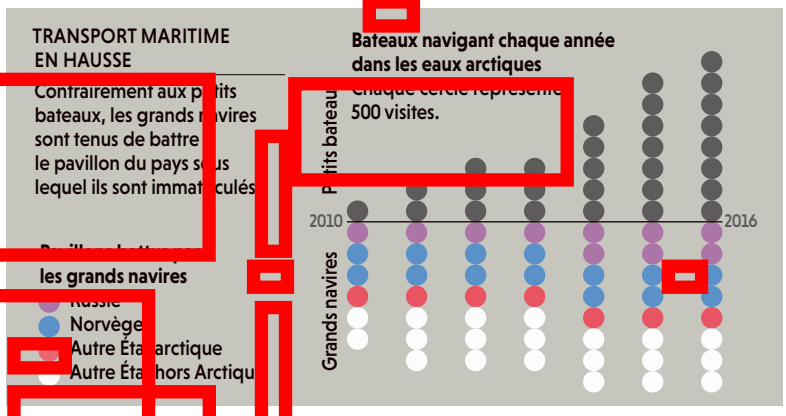
La Russie et la Norvège ont intérêt à créer un climat d'investissement stable

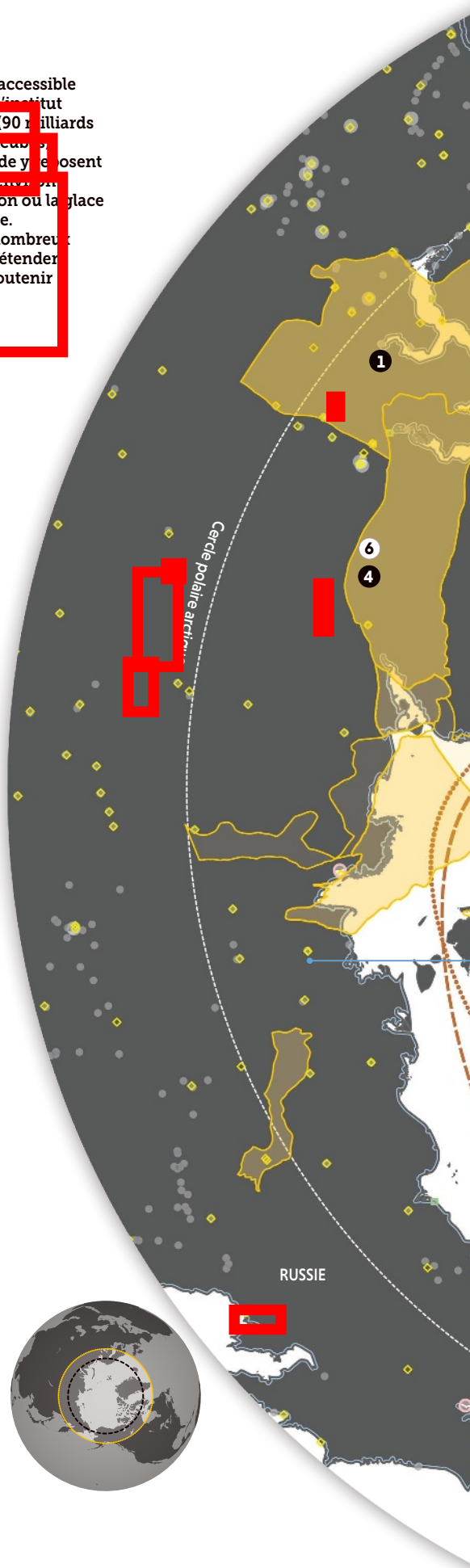
UNE RÉGION ACTIVE

Avec son dégel, l'Arctique devient de plus en plus accessible et convoité. En 2008, une étude exhaustive de l'institut géologique des États-Unis a déterminé que 13 % (90 milliards de barils) du pétrole et 30 % (47 000 milliards de mètres cubes) du gaz conventionnels encore à découvrir dans le monde y reposent (contre la profondeur n'excédant pas 500 mètres dans environ la moitié de l'océan Arctique, les endroits de cette portion où la glace s'est retirée sont déjà accessibles aux appareils de forage. Plusieurs pays, notamment la Russie, construisent de nombreux aéroports, ports maritimes et autres infrastructures. Et étendent leurs installations militaires afin de les protéger et de soutenir les routes de navigation de plus en plus fréquentées.



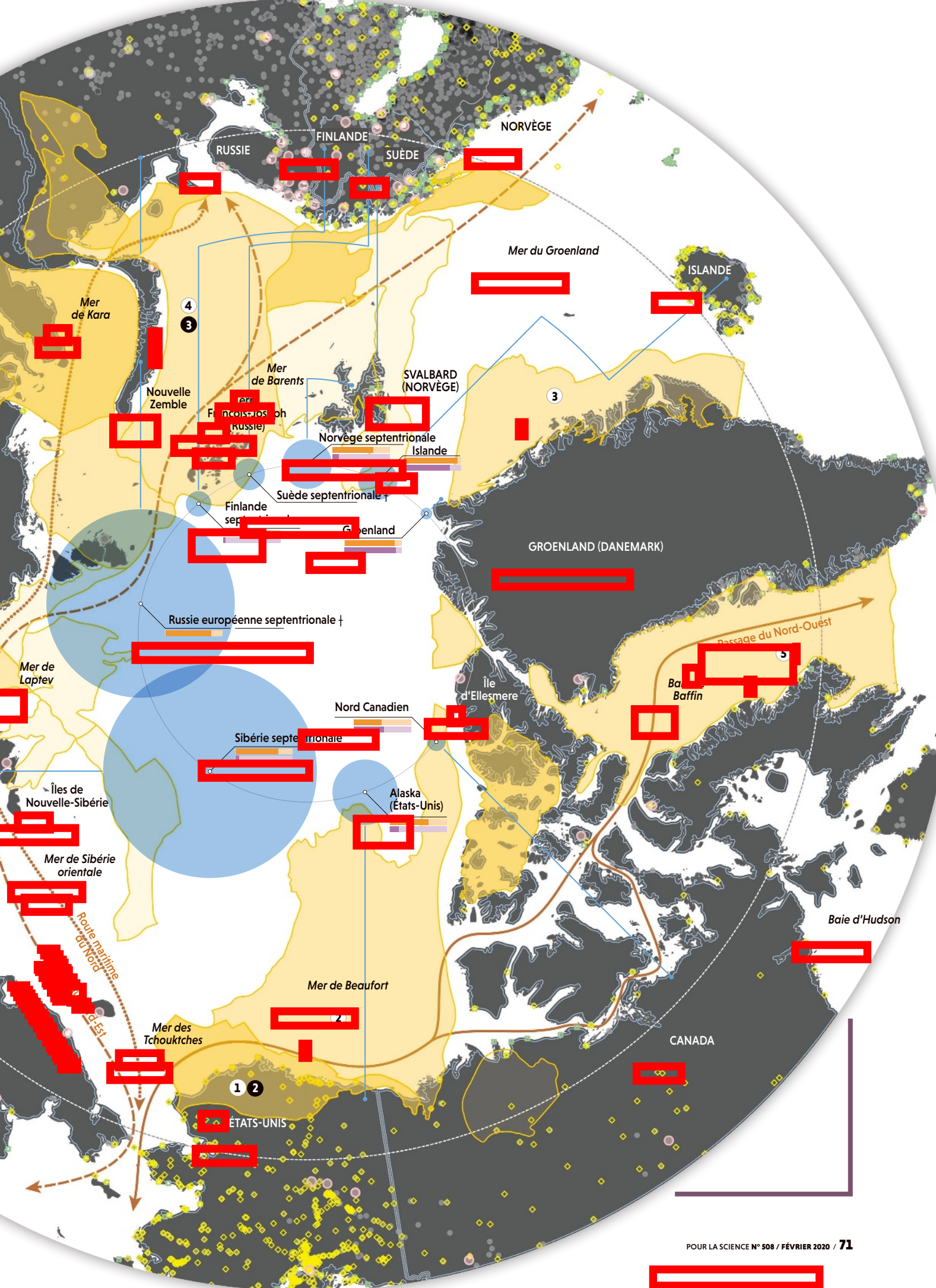






Le rayon des cercles représentés ci est donné par la formule (nombre de personnes)$^{2/3}$.
† Les données sur les autochtones / citadins ne sont pas disponibles.

© Katie Peek (carte) ; Mark Fischetti (texte) ; sources : USGS (données sur le pétrole et le gaz) ; Greg Fiske, WHRC, et spacequest.com (données de navigation) ; D. N. Berger et al. (éd.), The Indigenous World 2019, IWGIA, 2019 (populations sami et inuit) ; Tilastokeskus ; Statistiska centralbyrån ; Statistisk sentralbyrå ; Hagstofa Íslands ; Naatsorsueqqissaartarfik ; Statistique Canada ; Bureau du recensement des États-Unis ; Service fédéral des statistiques de l'État russe ; Arctic Portal (passages du nord-est et du nord-ouest) ; IISS et Heritage Foundation (installations militaires) ; Geonames (lieux habités, aéroports) ; World Port Index (ports)


NORVÈGE
FINLANDE
RUSSIE
SUÈDE
Mer du Groenland
ISLANDE
Mer de Kara
Mer de Barents
SVALBARD (NORVÈGE)
Nouvelle Zemble
Norvège septentrionale
Islande
Suède septentrionale †
Finlande
GROENLAND (DANEMARK)
Russie européenne septentrionale †
Passage du Nord-Ouest
Mer de Laptev
Île d'Ellesmere
Nord Canadien
Sibérie septentrionale
Îles de Nouvelle-Sibérie
Alaska (États-Unis)
Mer de Sibérie orientale
Route maritime du Nord
Baie d'Hudson
Mer de Beaufort
Mer des Tchouktches
CANADA
ÉTATS-UNIS

> finalement été mis en veilleuse. Toute revendication dans la zone arctique au-delà des ZEE est surtout symbolique. Il s'agit de garantir l'accès à des ressources éloignées au cas où elles deviendraient un jour précieuses, et non de se lancer dans une course à l'exploitation des ressources.

L'agressivité sur les routes maritimes de l'Arctique semble elle aussi peu probable. Malgré l'attrait de l'aventure, la plupart des transporteurs ne considèrent pas que ces passages sont compétitifs par rapport aux routes commerciales mondiales bien établies empruntant les canaux de Suez et de Panamá, même si ces routes sont plus longues. La nature saisonnière des corridors arctiques (la glace hivernale persistera pendant des années), ainsi que les conditions météorologiques difficiles et l'insuffisance des infrastructures pour respecter les délais, réduisent considérablement la pertinence des routes arctiques pour le commerce maritime international.

En septembre 2018, le tout premier transit sur la route maritime du Nord d'un porte-conteneurs de la compagnie de navigation danoise Maersk a été vu comme un coup d'essai. Il n'a pas marqué le début de transits commerciaux réguliers. Le chef des services techniques de Maersk a conclu : « Actuellement, nous ne voyons pas la route maritime du Nord comme une alternative commerciale viable aux routes est-ouest existantes. » Le trafic naval dans le Grand Nord pourrait contribuer à l'acheminement de matériel pour le nouveau port russe de Sabetta, dans la péninsule de Yamal, et à l'expédition du gaz naturel liquéfié extrait dans la région, surtout pendant les mois d'été, mais ces tâches concernent principalement les navires russes.

LA PÊCHE INTERDITE POUR SEIZE ANS

De nombreux pays et entreprises avaient espéré s'aventurer dans l'océan Arctique pour pêcher plus de poissons, car des espèces importantes comme la morue de l'Atlantique et le saumon du Pacifique migrent vers le nord. Mais les bénéfices sont très incertains. En 2009, les États-Unis ont fermé à la pêche commerciale de vastes zones de leur ZEE dans les mers des Tchouktches et de Beaufort, au large des côtes de l'Alaska, parce que les données manquaient sur la durabilité des pêcheries locales. En 2015, les cinq pays riverains de l'océan Arctique ont adopté un moratoire *de facto* (c'est-à-dire une suspension momentanée immédiate, sans texte de loi à l'appui) sur la pêche commerciale en haute mer (au-delà de leur ZEE). Puis, en 2018, ils ont signé une interdiction de la pêche commerciale dans cette zone pour seize ans. L'Islande, l'Union européenne, la Chine, le Japon et la Corée du Sud l'ont également signée. L'objectif principal est de se laisser du temps pour recueillir des données scientifiques approfondies sur les pêcheries et concevoir une utilisation commerciale durable et ordonnée de celles-ci.

UNE TRADITION DE COOPÉRATION

Pour évaluer la probabilité d'un conflit futur, il est important de se rappeler que la région arctique a toujours été un lieu de coopération internationale : les pays arctiques, certains États non arctiques et les représentants des populations autochtones collaborent pacifiquement depuis de nombreuses années. En 1991, les huit États ayant un territoire dans le cercle arctique et leurs peuples autochtones ont adopté la Stratégie de protection de l'environnement arctique, qui a favorisé la coopération en matière de surveillance et de conservation du territoire. Cet accord les a amenés, en 1996, à créer le Conseil de l'Arctique. Cette organisation, devenue le principal forum de l'Arctique, produit constamment des initiatives et des décisions coopératives fructueuses. Aujourd'hui, le conseil comprend également treize États non arctiques, des organisations non gouvernementales, des organismes scientifiques et des agences et commissions de l'Organisation des Nations unies. En 2018, il a même été sélectionné en vue du prix Nobel de la paix.

En 2018, le Conseil de l'Arctique a été sélectionné en vue du prix Nobel de la paix

On a reproché au conseil de ne pas s'occuper des questions militaires et de sécurité, mais celles-ci sont exclues de son mandat. S'attaquer à la question de la sécurité nécessite certainement des canaux diplomatiques, mais le conseil n'est pas le lieu pour cela. Les États ont déjà créé certains canaux, comme la Table ronde des forces de sécurité arctiques et le Forum des garde-côtes de l'Arctique, qui font partie des mesures dites de confiance et de sécurité mises en place entre les gouvernements précisément pour désamorcer les tensions potentielles. Pour résoudre la question des chevauchements de territoires, les

BIBLIOGRAPHIE

M. Mereed, **Les Mondes polaires**, 2019.

A. Piskarev *et al.*, **Geological Structures of the Arctic Basin**, Springer, 2019.

Arctic Report Card : Update for 2019, NOAA, 2019, arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019

Changes in the Arctic : Background and Issues for Congress, CRS Report, 2019, crsreports.congress.gov.

Site du Conseil de l'Arctique : arctic-council.org.

Site de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer : www.un.org/Depts/los.

États devraient négocier directement, comme ils le font déjà pour d'autres désaccords.

Le conflit est souvent une question de perception. Les règles plus strictes de la Russie concernant la route maritime du Nord pourraient se révéler bénéfiques si elles conduisent à une navigation plus sûre et à une meilleure protection de l'environnement. Les règles relatives aux voies maritimes proches des côtes ne sont pas propres à la Russie ou à l'Arctique ; de nombreux textes régulent aussi le passage dans les canaux de Suez et de Panamá. Quant aux États-Unis, ils auraient sans doute intérêt à utiliser leur nouveau brise-glace lourd – le seul dont ils disposeront lorsqu'il sera livré, en 2024 – pour améliorer l'accès à leurs propres eaux arctiques tout au long de l'année. De plus, les brise-glace ne sont pas des bateaux militaires et, même s'ils l'étaient, un seul navire ne constituerait pas une menace crédible pour l'importante flotte russe de brise-glace.

Les actions qui paraissent provocatrices ont par ailleurs d'autres explications possibles. Pour de nombreux citoyens russes et peuples autochtones, l'Arctique est au cœur de leur identité, construite sur des siècles d'exploration et de maîtrise du Nord. Lorsqu'une expédition sous-marine russe a planté un drapeau sur le plancher océanique du pôle Nord, en août 2007, la prouesse ne visait pas tant à se saisir du sol ; c'était un spectacle destiné à un public national, symbolisant la capacité de la Russie à atteindre les points les plus éloignés de l'Arctique.

Certes, comme partout ailleurs, il pourrait quand même y avoir une confrontation, et peut-être à partir d'une source inattendue. Depuis 2013, en effet, les navires chinois ont effectué au moins 22 voyages commerciaux dans le passage du Nord-Est, ce qui représente l'une des plus importantes utilisations non russes de cette route. La Chine tente également de placer l'Arctique dans un cadre mondial. En janvier 2018, le gouvernement chinois a publié un livre blanc intitulé *La Politique arctique de la Chine* qui déclare que « la situation de l'Arctique dépasse maintenant ses États d'origine inter-Arctique ou sa nature régionale ». Mais l'arrivée de la Chine ne signifie pas que les enjeux ont grimpé. La Russie et le Groenland se félicitent de ses investissements. La coopération économique pourrait bien favoriser la coopération politique et l'emporter. ■



L'ESSENTIEL

> Du XVIe-XVIIIe siècles, il n'existe pas de spécialiste de la douleur, celle-ci est néanmoins omniprésente dans les ouvrages de médecine pratique.

> Médecins et chirurgiens tentent de saisir ce que ressentent leurs patients et de les soulager avec des antalgiques ou en opérant vite.

> Au XVIIe siècle, à la suite de Descartes, des philosophes s'emparent aussi du phénomène de la douleur, qui permet de clarifier le lien entre le corps et l'esprit.

LES AUTRICES



RAPHAËLE ANDRAULT
chargée de recherche au CNRS (IHRIM, Lyon) en philosophie et histoire des sciences



ARIANE BAYLE
maîtresse de conférences en littératures comparées à l'université de Lyon (IHRIM)

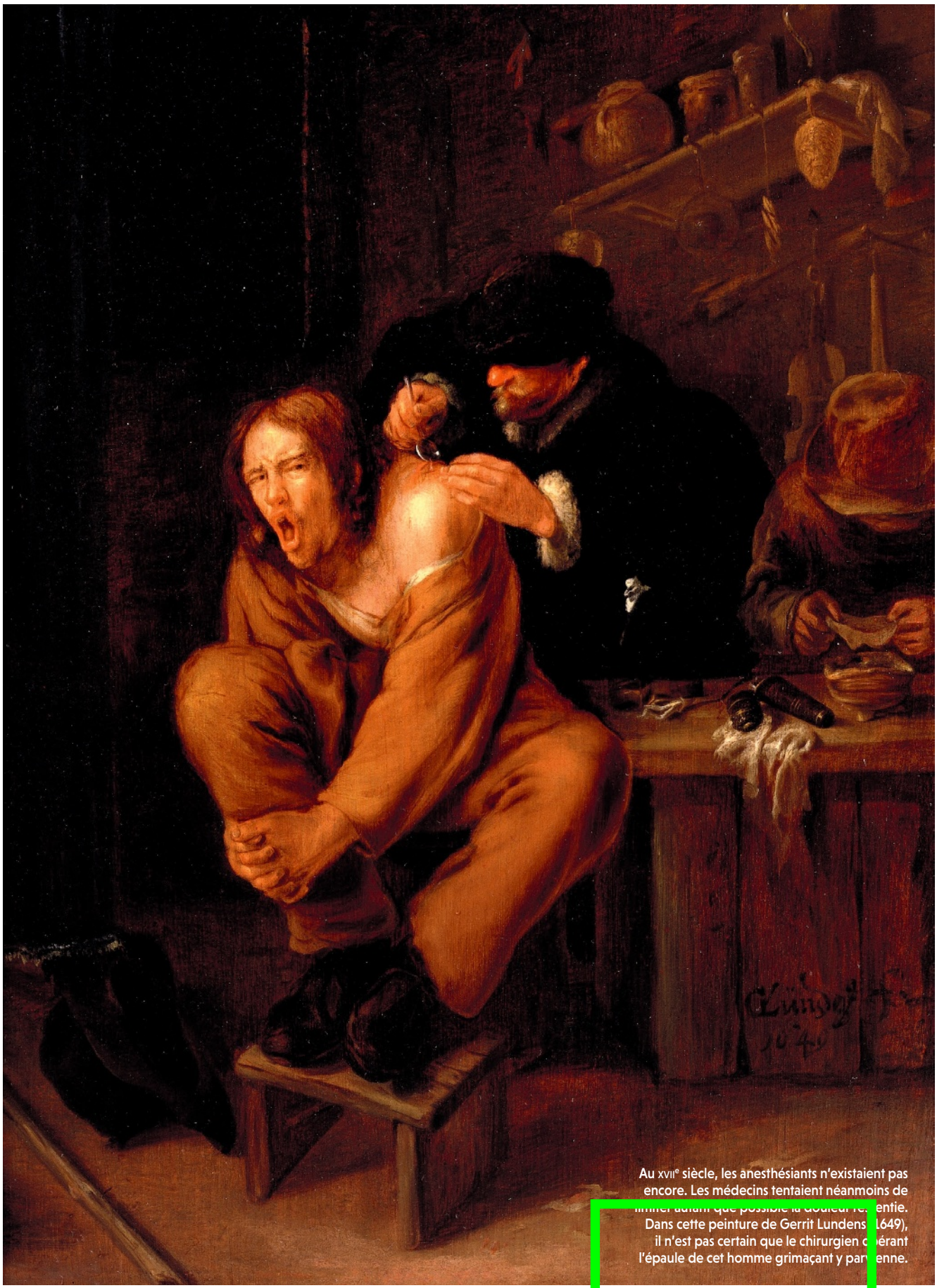
Le médecin de l'Époque moderne face à la douleur

Loin d'être négligée jadis, la douleur était déjà un sujet de préoccupation des médecins aux XVIe-XVIIIe siècles, comme le montre une exposition qui se tient jusqu'au 23 février à la bibliothèque de santé de la faculté de médecine Lyon Est.

Quand, par jeu, on demande à des amis s'ils auraient aimé vivre dans le passé, on s'expose forcément à des réponses très diverses: il y a ceux qui se projettent avec délice dans le monde antique et auraient rêvé de côtoyer Socrate; ceux qui s'imaginent preux chevalier ou belle dame sans merci dans un Moyen Âge idéalisé; d'autres, encore, auraient voulu connaître les fêtes de cour sous l'Ancien Régime et les fastes de la Couronne. Mais presque toujours, la rêverie bute sur une restriction: voyager dans le passé, d'accord, mais à condition de ne pas connaître «les maladies» et les souffrances atroces que la médecine de l'époque ne savait pas encore soulager. Nos contemporains, conscients de la puissance de leur savoir médical et de leurs technologies avancées, ne peuvent que frémir en pensant aux douleurs qu'ont dû endurer leurs ancêtres, oubliant au passage la répartition très inégale des ressources thérapeutiques dans le monde.

Lorsqu'on pense à cette période lointaine qui a précédé l'usage des anesthésiques, on imagine aisément des médecins non seulement impuissants mais également indifférents à la douleur de leurs malades. L'histoire des sciences elle-même a renforcé l'idée que la douleur est un problème médical relativement récent. Bien des historiens considèrent la fin du XVIIIe et le XIXe siècle comme un moment d'entrée dans un régime de sensibilité «moderne»: à partir de cette période, que ce soit pour des raisons démographiques, techniques ou doctrinales, la société occidentale aurait progressivement abaissé son seuil de tolérance à la douleur; celle-ci serait alors devenue un objet digne d'intérêt pour les médecins et les physiologistes. Le développement des anesthésiques au cours du XIXe siècle aurait accompagné ce changement de mentalité, voire de sensibilité.

L'histoire des sensibilités n'est certes pas une science exacte, mais il est légitime à la lecture des textes d'Ancien Régime, de s'interroger sur la validité d'une telle coupure. Est-il vrai que les médecins ne s'intéressaient que >



Au XVII[e] siècle, les anesthésiants n'existaient pas encore. Les médecins tentaient néanmoins de limiter autant que possible la douleur ressentie. Dans cette peinture de Gerrit Lundens (1649), il n'est pas certain que le chirurgien opérant l'épaule de cet homme grimaçant y parvienne.

© Wellcome Collection

> peu à la douleur avant le siècle des Lumières, soit pour des raisons culturelles, soit parce qu'ils se savaient impuissants à la soulager ? Pensaient-ils, dans le contexte d'une société où la religion chrétienne prescrivait largement les comportements, que la douleur pouvait être un bien ? C'est pour répondre à ces questions qu'avec l'aide de collègues historiens, philosophes et littéraires, nous avons parcouru un grand nombre de textes médicaux parus entre 1500 et 1750. Nos premiers résultats nous ont surpris : même si les médecins de cette époque ne parviennent qu'en partie à remédier à la douleur, notamment à la douleur chronique et intense, ils la mentionnent, s'efforcent de comprendre sa fonction et cherchent toujours à la soulager. Plus encore, les questions qu'ils abordent résonnent bien plus fortement qu'on ne l'imaginait avec celles qui nous préoccupent aujourd'hui.

DES MÉDECINS AU CHEVET DE LA DOULEUR

Dans la littérature médicale des XVI^e^ et XVII^e^ siècles, la douleur ne fait que très rarement l'objet de traités ou de chapitres à part entière ; c'est le plus souvent une question transversale abordée à l'occasion de développements sur telle blessure, telle maladie ou telle thérapeutique. Il n'y a pas d'algologue – spécialiste de la douleur – à l'époque. Mais cela ne signifie pas que la douleur soit négligée par les médecins. Elle les préoccupe à deux titres au moins : elle est le premier motif de consultation, le premier objet de la plainte du malade ; elle est aussi un signe qui permet d'orienter le diagnostic.

La question de la douleur trouve une place de choix dans les ouvrages de médecine pratique, notamment dans les recueils de récits de cas, genre en plein essor sur l'ensemble de la période. Ainsi, l'Espagnol Gaspar Torrella est l'un de ces médecins qui accordent une attention particulière au vécu du patient. Spécialiste de la syphilis, maladie nouvelle dans l'Europe de la Renaissance, causant des souffrances très intenses, il rassemble dès 1497 quelques récits de cure dans un premier traité (*voir l'encadré page 78*). Et, trois ans plus tard, à partir de son expérience de praticien, il publie un dialogue sur la douleur (*Dialogus de Dolore*).

La douleur n'a cependant pas besoin d'être spectaculaire pour être mentionnée par les médecins : les maux ordinaires, du ventre ou de la tête, ne sont pas oubliés. Et lorsqu'elle est violente et insupportable, elle ne semble pas traitée à la légère. Dans les situations les plus graves, où la douleur fait craindre des convulsions, des syncopes, voire la mort, il est prescrit que le médecin ou le chirurgien suspende immédiatement ses gestes curatifs pour tenter de l'atténuer.

Comment les médecins soulagent-ils les différents types de douleur ? Il y a d'abord un certain nombre de gestes techniques permettant de supprimer temporairement la sensibilité, comme l'application de froid. Mais la plupart du temps, les médecins administrent des « anodins » (du grec *an-odunè*, « qui supprime la douleur »), ce que nous appelons aujourd'hui des antalgiques. Ces substances font partie de l'arsenal thérapeutique en usage depuis l'Antiquité. Elles sont de plusieurs sortes. La première correspond à tous les traitements curatifs qui s'attaquent à la cause du mal, comme des purgatifs pour traiter les maux de ventre.

UNE PANOPLIE D'ANODINS

La deuxième sorte d'anodins correspond principalement à des remèdes à base de plantes considérées comme adoucissantes : la mauve, l'aneth, l'orge, le jaune d'œuf, ou encore l'huile d'olive avec macération de rose… La liste varie d'un auteur à l'autre, de même que le mode d'administration. Souvent mélangés avec du vin ou de l'eau-de-vie, ces anodins sont aussi bien appliqués localement, par exemple sous la forme de liniment ou de cataplasme, que par voie interne, en décoction, électuaire (pâte molle), clystère (voie anale) ou pessaire (voie vaginale). Pour les douleurs les plus fortes, ces substances sont mélangées avec des préparations à base d'opium peu coûteuses.

La troisième sorte d'anodins correspond aux « narcotiques » qui, en endormant la sensibilité, suppriment la douleur. Il s'agit principalement du pavot à opium et de la jusquiame, parfois aussi de la datura. Contrairement à une opinion bien diffusée aujourd'hui, l'usage antalgique des narcotiques n'est pas banni, mais présenté comme une voie thérapeutique



Le visage de la douleur corporelle simple, selon Charles Le Brun, premier peintre de Louis XIV (gravure posthume, 1727). À l'époque, les médecins essayaient déjà de comprendre la douleur ressentie par leurs patients en examinant les expressions du visage



À VOIR

LE MÉDECIN FACE À LA DOULEUR XVI^e^-XVIII^e^ SIÈCLES

Jusqu'au 29 février 2020, cette exposition sur la prise en charge de la douleur aux XVI^e^-XVIII^e^ siècles propose un parcours mêlant documents d'époque et entretiens avec des neurologues spécialistes de la douleur.
Lieu : BU Santé Rockefeller, avenue Rockefeller, Lyon 8^e^
https://flnyurl.com/y7h…5k3y9

© Bibliothèque nationale de France

possible depuis l'Antiquité. Bien sûr, dans le détail, les positions des médecins varient : d'un côté, ceux qui conseillent d'y avoir plus systématiquement recours au nom du caractère intolérable de la douleur ; de l'autre, ceux qui ne recommandent qu'un usage prudent et de dernier recours, puisqu'un mauvais dosage de ces plantes risque de se révéler mortel. Si hier comme aujourd'hui, il arrive que la pratique des thérapeutes diffère en fonction de leurs convictions, les textes médicaux, eux, ne semblent pas réfracter un discours inspiré de la religion qui valoriserait la douleur rédemptrice et interdirait l'utilisation des anodins.

Quant à la chirurgie, elle a, dès ses origines, dû se confronter au problème de la douleur, précisément parce qu'elle la provoque. Le chirurgien doit agir rapidement pour la minimiser dans le temps de l'opération, en mettant de côté ses affects. Le patient, lui, doit l'accepter, explique le chirurgien Ambroise Paré en 1564 dans les *Dix Livres de la chirurgie*, afin d'éviter des souffrances plus grandes encore, les douleurs « inhumaines » causées par la blessure ou la maladie.

Au milieu du XVI^e^ siècle, avec le renouveau des connaissances anatomiques, les choses se précipitent. Devant la fréquence des blessures par armes à feu, médecins et chirurgiens sont contraints de déployer une inventivité inédite. En 1552, Paré aurait pratiqué pour la première fois la ligature des artères et des veines dans un cas d'amputation, en renonçant à l'application des fers ardents, ces cautères provoquant une terrible souffrance et, bien souvent, ne faisant qu'aggraver la blessure. Précisément parce qu'elles permettent de sauver la vie d'un grand nombre de soldats, ces nouvelles opérations transforment la réflexion sur la douleur. Notamment, l'objet paradoxal qu'est le membre fantôme devient l'occasion d'une alliance renouvelée entre médecine et philosophie.

LA DOULEUR DU MEMBRE FANTÔME

La douleur du membre fantôme est celle ressentie par un amputé au niveau du membre qu'il a pourtant perdu dans l'opération. Au XVII^e^ siècle, c'est à partir de ce phénomène remarquable – et déconcertant –, déjà décrit par Ambroise Paré, que René Descartes met en évidence l'itinéraire du message nerveux. Pour lui, la sensation douloureuse n'est ressentie qu'au moment où le message est transmis au cerveau.

La douleur joue chez Descartes un rôle stratégique aussi bien dans l'exploration de l'anatomie du corps humain que dans la réflexion philosophique sur le statut de la connaissance sensible. Certes, Descartes considère l'esprit et le corps comme deux choses bien distinctes. Cependant, contrairement à une idée répandue, il ne les pense pas dans un strict rapport d'opposition. Dans les *Méditations métaphysiques*, la douleur est l'une des sensations internes qui nous révèlent le mieux que nous ne sommes pas seulement logés en notre corps « ainsi qu'un pilote en son navire ». Autrement dit, nous ne le connaissons pas comme nous connaissons les objets extérieurs, de loin et sans affect. La douleur nous montre que notre esprit est intimement « confondu et mêlé » à notre corps.

Certains philosophes, prolongeant cette réflexion, accordent à la sensation douloureuse un statut privilégié dans l'examen des rapports entre le corps et l'esprit. Le concept d'une douleur « sentinelle » se développe : elle serait un signal bénéfique, voire nécessaire, un avertissement nous permettant de nous protéger de façon réflexe de ce qui menace notre intégrité corporelle. Les sensations ponctuelles et aiguës provoquées par une brûlure ou une piqûre, illustrent de façon exemplaire ce qu'on appellera ultérieurement l'utilité fonctionnelle de la douleur.

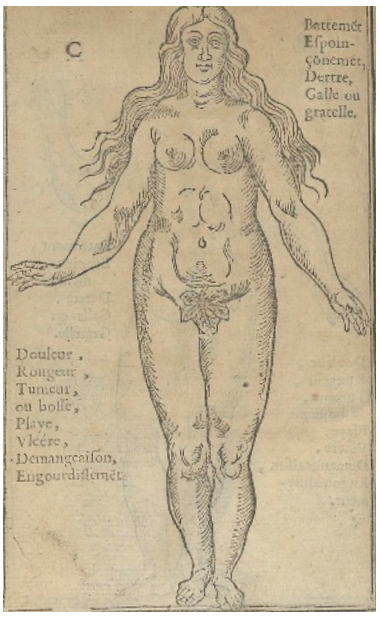
Toutefois, comment rendre compte des douleurs prolongées, perçues comme inutiles et injustifiables, objectent d'autres philosophes ? Que penser des cas de maladies chroniques, comme la goutte ou la migraine, ou des situations particulières, comme l'accouchement ou l'agonie ? Si le dialogue entre médecine et philosophie n'a rien d'inédit en soi, il s'attache ainsi désormais à un objet nouveau : le message sensoriel de la douleur, en tant qu'il nous livre des informations précieuses aussi bien sur notre anatomie que sur notre cognition.

Bien avant la Révolution française, la douleur fait donc l'objet d'interrogations et de débats qui entrent en résonance avec certaines préoccupations actuelles. Avec nos collègues, nous avons tenté de nous servir du passé pour >

CONSULTATION À DISTANCE

Dans son livre *La Présence des absents* (1642), le médecin Théophraste Renaudot propose un modèle de consultation à distance pour pallier le manque de médecins compétents dans certaines régions. Le malade doit indiquer au crayon le lieu de la douleur, entourer le terme approprié (douleur, démangeaison…) et préciser si la douleur est petite, moyenne, grande ou insupportable. Les termes sont identiques pour les hommes et les femmes, mais non les quatre images qui représentent chacun des deux sexes de face et de dos.

R. A. ET A. B.



> en faire autre chose qu'un produit de contraste valorisant les acquis thérapeutiques de la médecine contemporaine. Plutôt que d'évaluer les connaissances anciennes à partir des coordonnées présentes, nous avons inversé la démarche. Sur la suggestion de notre collègue historienne Elisa Andretta, nous avons proposé à trois neurologues, Nicolas Danziger, Luis Garcia Larrea et Patrick Mertens, de se confronter à des discours sur la douleur tirés d'ouvrages anciens (1500-1750), pour mieux comprendre quel est le regard actuel sur cette question et repérer quelques invariants.

LES MILLE MAUX DE LA DOULEUR

Prenons l'exemple des signes de la douleur. Comment les médecins les repèrent-ils? Quels sont les moyens d'accéder aux sensations des malades? La première réponse paraît évidente: par ce qu'en disent ces derniers. Hier comme aujourd'hui, cependant, cette évidence bute sur plusieurs problèmes. Les médecins de l'époque soulignent d'abord que le vocabulaire des patients correspond rarement aux catégories de douleur dont les experts se servent pour établir leur diagnostic. Certes, les malades sont capables d'évoquer une douleur «cuisante», «poignante» ou encore «mordante»; mais iront-ils jusqu'à parler spontanément de douleurs «astringentes»?

De nos jours, des questionnaires médicaux utilisent d'autres termes. Ils mentionnent plutôt des douleurs «irradiantes», «transperçantes», ou des sensations de compression, mais, pour le patient, faire correspondre son propre ressenti à ces nuances sémantiques n'est pas toujours facile. Autre obstacle récurrent: certains malades ne peuvent rien dire, parce qu'ils sont trop jeunes pour parler ou trop accablés pour s'exprimer. La formule de Marin Cureau de la Chambre, médecin de Louis XIV, serait encore pertinente aujourd'hui: «Le mot de douleur, tout simple qu'il est, contient mille sortes de maux.» Les mots échouent à signifier les différentes sensations douloureuses, qui varient selon la cause du mal, la partie du corps qui est atteinte et l'état psychique et physique de celui qui souffre.

TRAITER LA DOULEUR D'UN SYPHILITIQUE

Un jeune homme de Lombardie, âgé de 30 ans, de nature flegmatique, attrapa la *pudendagra* flegmatique par la voie de la contagion. Cela faisait dix mois quand apparurent de grosses pustules croûteuses dont sortait un pus épais, blanc, presque opaque, accompagnées de douleurs. Le patient fut soulagé deux fois, des pustules et des douleurs, avec certains onguents ; mais la seconde fois il rechuta dans une maladie plus grave et des douleurs plus intenses. [...]

Quand il était en bonne santé, il était gras ; à présent il est devenu maigre, chose étonnante, puisqu'il se nourrit bien [...]. Les fonctions de son corps ne sont manifestement pas atteintes. Le fonctionnement de son cerveau serait digne d'être loué, n'étaient les douleurs nocturnes qui l'empêchent de dormir. C'est pourquoi je lui ai prescrit d'habiter une pièce plutôt chaude et sèche [...] ; je lui ai prescrit aussi de se vêtir, du mieux qu'il pouvait, de vêtements, coiffes et chaussures de bonne qualité et je dis cela parce qu'il était pauvre et indigent. Je l'ai exhorté à être heureux, joyeux, à fuir la colère, la tristesse et la solitude et à garder courage [...].

Le 8 octobre 1497, [...] il a reçu un clystère purgatif et quand la mobilité des matières et aussi la mauvaise influence des veilles furent ainsi attaquées, à la cinquième heure de la nuit je recours à une poudre composée ainsi : « Prendre trois drachmes de poudre de *dyapapaver*, une once de sirop de violettes, trois onces d'eau de menthe, une once d'eau de pavot, et mélanger. » Après l'avoir pris il s'endormit peu après minuit, jusqu'à l'aurore. Quand tout cela fut fait, je lui prescrivis de faire de l'exercice tous les jours avant le repas, bien couvert, jusqu'à ce qu'il transpire.

Le jour suivant, il prit à l'aube le sirop composé comme suit : « Prendre une once de sirop de trois racines avec du vinaigre, une once et demie de sirop de cuscute, une once d'eau de fenouil, de fumeterre et de chélidoine. Mélanger, et prendre ce sirop chaud à l'aube, et dormir ensuite. » À trois heures, je lui ai prescrit d'aller à l'étuve ; il y est resté deux heures environ, il a sué peu, raison pour laquelle je lui ai prescrit de retourner à l'étuve à 22 heures, et là, il a sué davantage. Il est revenu ce soir-là vers moi et il m'a dit : « Monsieur, je vais bien ; je suis libéré du grand poids de la maladie ; j'arrive à soulever les bras jusqu'à la tête, je peux jeter des pierres, je peux marcher sans canne. Que pourrais-je faire encore ? » Je lui ai dit de poursuivre la diète accoutumée et, s'il voulait se purger, de prendre avant le dîner un clystère et, à cinq heures, de prendre à nouveau la poudre de *dyapapaver* mentionnée plus haut. Une fois tout cela fait, je lui ai prescrit d'oindre toutes les pustules restantes avec l'onguent ainsi composé, car la plus grande part de celles-ci avaient été soignées par l'évacuation des matières et par la sueur : « Prendre cinq parties de térébenthine avec de l'eau, une once et demie d'eau de fumeterre, une drachme et une demi-once de beurre frais, trois drachmes et une demi-once de soufre vif en poudre très fine, une once et demie de jus de citron. Mélanger et laver l'ensemble trois fois avec de l'eau de chélidoine ; le malade doit en oindre ses plaies, quand il est chaud, dans un lieu chauffé, pendant six jours de suite. » Le septième jour, il est entré dans l'étuve, il s'est lavé et il a sué et en sortant il était exempt de toute tache. Maintenant il travaille comme avant, à construire des maisons, et dans la ville de Rome il est considéré comme le meilleur maître. Néanmoins, je lui ai ordonné de prendre pendant quelques jours une pilule composée de lierre et d'agaric et j'espère que le mal ne reviendra pas.

GASPAR TORRELLA,
Tractatus cum consiliis contra pudendagram seu morbum Gallicum
(*Traité et conseils contre la pudendagra ou mal français*), 1497.

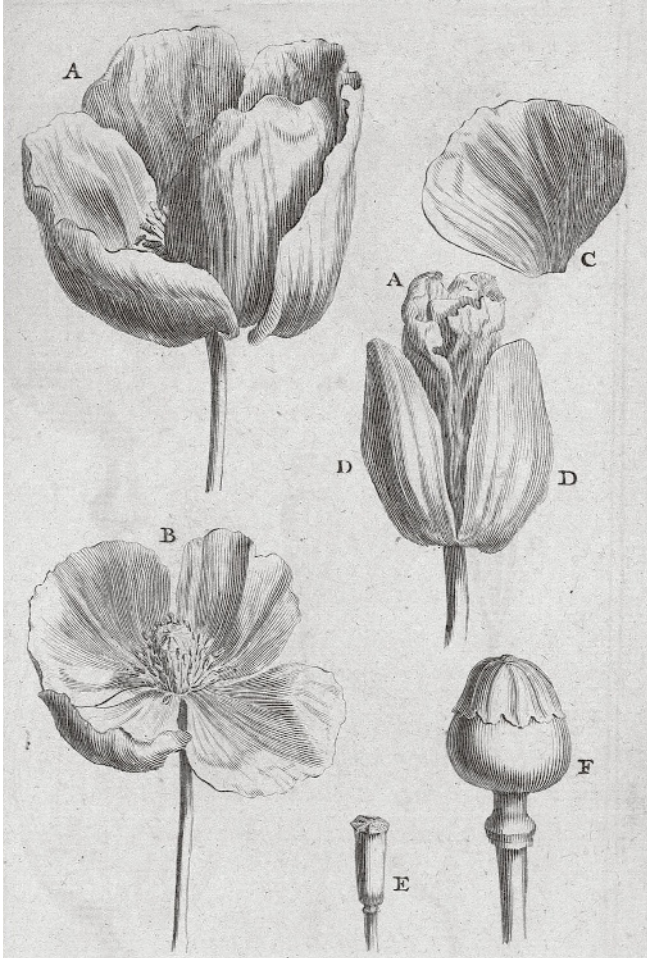
Texte établi par Concetta Pennuto et traduit par Brigitte Gauvin, dans A. Bayle et B. Gauvin (dir.), *Le Siècle des vérolés*, Jérôme Millon, pp. 121-123, 2019.

UNE PHARMACOPÉE REMONTANT À L'ANTIQUITÉ

Pour la pharmacopée, l'une des principales sources des [illegible] médecin et botaniste grec du Ier siècle. Son ouvrage, connu sous le nom latin *De Materia Medica*, connaît de multiples traductions au XVIe siècle, notamment par l'Italien Pietro Andrea Mattioli, dont le commentaire du texte fait date.

Selon Dioscoride, le jus d'opium « pris à la grosseur d'un grain d'orobe, [...] apaise toutes douleurs, aide à la digestion, provoque à dormir, et est bon à la toux [...]. Mais si on en boit en plus grande quantité, il nuit grandement : car il fait tomber la personne en léthargie, et enfin la fait mourir ». L'une des difficultés est de doser précisément les préparations à base d'opium. Il n'y a pas alors d'opium normalisé. Cela explique aussi pourquoi il est difficile de comparer son usage thérapeutique dans l'Antiquité et à l'Époque moderne.

R. A. E. T A. B.
Les Commentaires de M. P. André Mattiolus, sur les Six Livres de Dioscoride, trad. M. Antoine du Pinet, Lyon, Pierre Rigaux, livre III, p. 38[illegible] 1605.



Le pavot somnifère, qui produit le pavot *Papaver somniferum*, ici représenté dans les *Éléments de botanique* (tome V) de Joseph Pitton de Tournefort (1797).

L'insatisfaction à l'égard du langage est, chez Cureau de la Chambre, à l'origine d'une recherche de signes universels ou « caractères » de la douleur. Elle se signalerait par un visage renfrogné et un froncement prononcé des sourcils ; au niveau du corps, on observe, selon lui, un mouvement de contraction, voire de rétractation généralisée, d'ailleurs commun à tous les animaux. Cependant les signes de douleur sont parfois ambigus. L'abattement, voire un léger sourire ou un rire « sardonique », sont parfois la traduction d'une souffrance intense ou prolongée. Quand la douleur s'installe, ces signes évoluent et il n'est pas rare qu'un patient, pourtant très affecté, soit réduit au silence. Comme le notent alors certains médecins, il arrive qu'une forte douleur cause un état de tristesse et un désir de mort qui brouillent ses manifestations habituelles.

LIRE LA DOULEUR SUR LE VISAGE

La volonté de peindre au plus juste l'émotion douloureuse rencontre les recherches actuelles. Certains spécialistes estiment en effet que la douleur se traduit par une microexpression faciale typique, indépendante de la culture du patient. Mais les neurologues que nous avons interrogés soulignent l'une des limites de cette thèse : quand les émotions sont intenses, leurs expressions faciales sont intrinsèquement ambiguës. Et la douleur n'échappe pas à cette règle. Il est certes utile, par exemple en contexte hospitalier, de savoir repérer certains signes de douleur chez des patients incapables de parler. Mais en voulant à tout prix objectiver ces signaux, on s'expose à passer à côté d'une douleur atypique ou chronique, et le risque est fort de confondre une représentation ethnocentrée de cette dernière avec son expression universelle.

Un des mérites de ce dialogue entre médecine passée et présente aura été de montrer la permanence des questionnements et les résistances qu'oppose cet objet à ceux qui tentent de le théoriser. Aujourd'hui, malgré les progrès massifs de la neurologie – entre autres grâce à l'imagerie médicale –, des apories demeurent. Les différents moyens de représentation, verbaux ou visuels, les diverses tentatives pour objectiver la douleur ne permettent d'appréhender que très imparfaitement le ressenti du patient. La douleur est une chose terriblement concrète pour celui qui l'éprouve, mais difficile à communiquer ; dans le meilleur des cas, elle est une évidence localisable et imaginable pour celui qui l'observe, mais elle reste pourtant une expérience impartageable. Les définitions les plus récentes de la douleur, qui en font non plus une simple sensation ou émotion, mais une expérience multiple, à la fois sensorielle, affective et cognitive, intégrant l'histoire du patient, ont du moins le mérite de reconnaître qu'elle est encore un objet récalcitrant pour la pensée. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Pennuto, **Connaissance et espoir de guérison : Gaspar Torrella, médecin de la pudendagra**, *Histoire, médecine et santé*, vol. 9 (numéro « Syphilis », sous la direction de A. Bayle et C. Pennuto), pp. 91-108, 2016.

N. Danziger, **Vivre sans la douleur ?**, Odile Jacob, 2010.

M. Cureau de la Chambre, **Les Caractères des passions. Volume IV. Où il est traitté de la Nature & des Effets de la Douleur**, Pierre Rocolet, 1659.

R. Descartes, **Les Méditations métaphysiques**, traduites du latin, Jean Camusat et Pierre Le Petit, 1647 [1641].

A. Paré, **Dix Livres de la chirurgie**, Jean Le Royer, 1564.

LES SECRETS DU NOMBRE 42

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*

Comment un nombre parfaitement banal a attiré l'attention des amateurs de science-fiction, des geeks... puis des mathématiciens.

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)

L'article de ce mois est étrange car son thème vous semblera, dans un premier temps, manquer de sérieux, avant qu'un de ses aspects inattendus ne surgisse et montre une nouvelle fois que tout sujet mathématique peut se heurter à des obstacles qui le rendent intéressant.

Tout le monde éprouve une fascination [illegible] le la mort du ministre Robert Boulin ou celle de la disparition de Xavier Dupont de Ligonnès. Cela reste vrai même si à l'origine il n'y a qu'une blague, comme c'est le cas dans le roman de science-fiction *Le Guide du routard galactique*, paru en anglais en 1979. Douglas Adams, son auteur, mentionne dans la partie finale de cette œuvre que la réponse à la grande question sur la vie, l'univers et tout le reste est 42 (« *The answer to the ultimate question of life, the universe and everything is 42* »).

Ce premier roman d'une série de cinq évoque un ordinateur ultrapuissant qui, en calculant pendant 7,5 millions d'années, finit par répondre « 42 » à ceux qui l'interrogent au sujet de la question ultime sur la vie, l'univers et tout le reste. Les personnages réalisent que, malheureusement, la réponse donnée à la fin du premier récit n'est pas très utile, car la question n'a pas été formulée de manière assez claire et précise. L'ordinateur répond alors que pour trouver le bon énoncé de la question dont la réponse est 42, il lui faudra construire une nouvelle version de lui-même et que cela prendra du temps. Cette nouvelle >

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

1 NOMBRES DE CATALAN

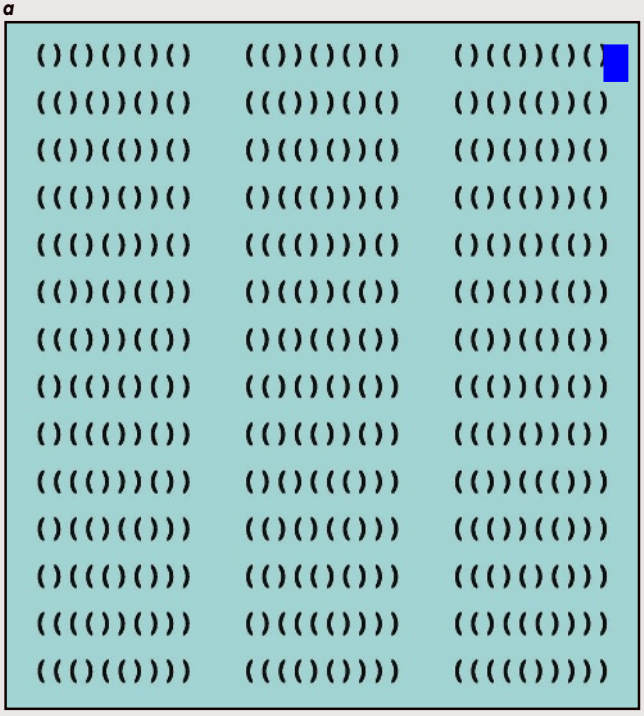
Les nombres de Catalan sont extrêmement rares, bien plus que les nombres premiers : seuls quatorze de ces nombres sont inférieurs à 1 milliard. Leur suite commence par :
1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1 430, 4 862, 16 796, 58 786, 208 012, 742 900, 2 674 440, 9 694 845, 35 357 670, 129 644 790, 477 638 700, 1 767 263 190, 6 564 120 420, 24 466 267 020, 91 482 563 640, 343 059 613 650, 1 289 904 147 324, 4 861 946 401 452, 18 367 353 072 152, 69 533 550 916 004, 263 747 951 750 360, ...

Le nombre 42 est le nombre de Catalan $c(5)$. Cela signifie en particulier qu'il y a 42 façons de placer 5 paires de parenthèses correctement *(a)* : une paire ne se ferme jamais avant d'avoir été ouverte, et ne se ferme jamais avant que toutes celles ouvertes depuis qu'elle a été ouverte soient elles-mêmes fermées.

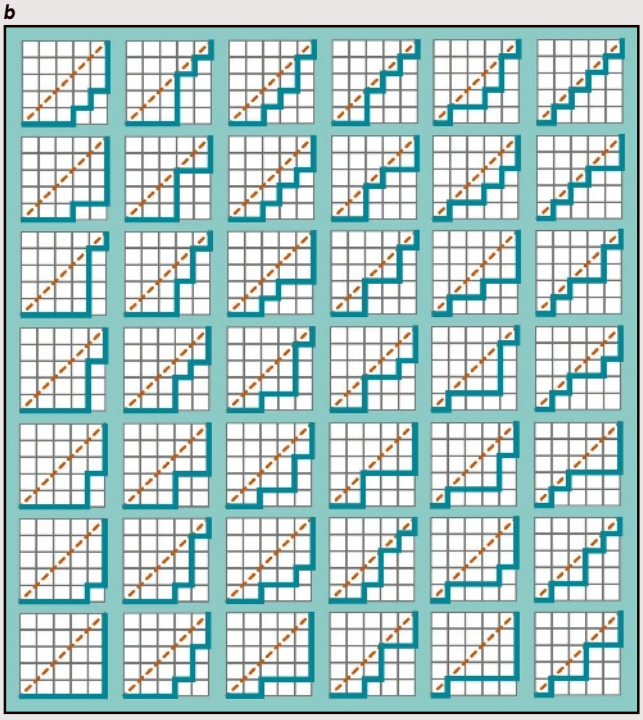
Cela signifie aussi que si l'on se donne un quadrillage de côté 5 et que, en suivant les côtés des carrés du damier, on veuille joindre le coin en bas à gauche au coin en haut à droite sans couper la diagonale et sans jamais redescendre, il y a 42 façons de le faire *(b)*.

De même, le nombre d'arbres binaires à 6 feuilles est 42 *(c)*, le nombre de façons de paver le côté d'un escalier de 5 marches par des rectangles est 42 *(d)* et le nombre de façons de découper un heptagone régulier en plusieurs triangles en faisant se rejoindre des sommets est 42 *(e)*.

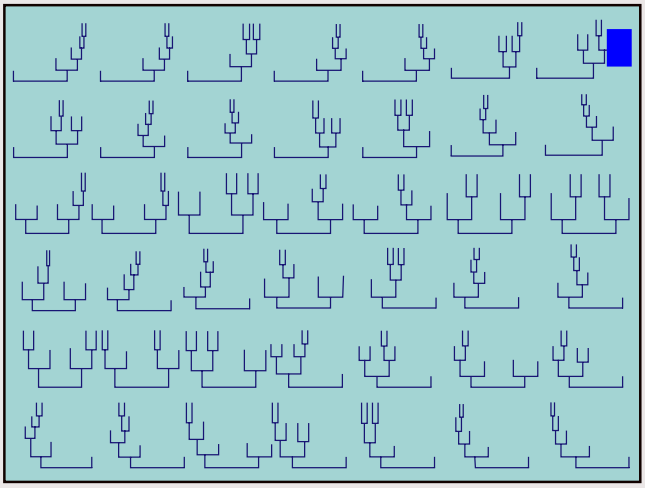
a



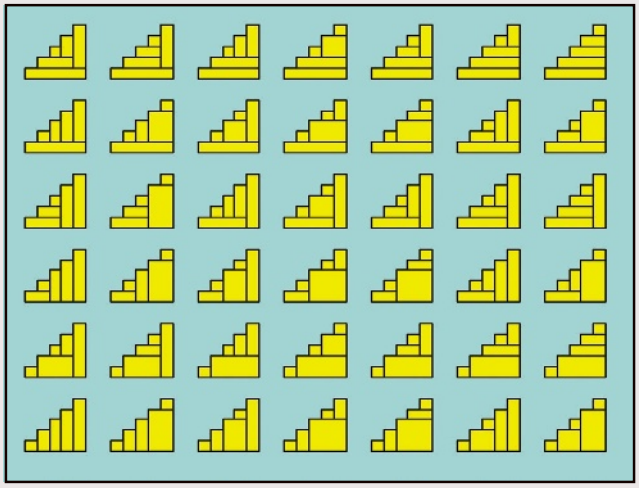
b



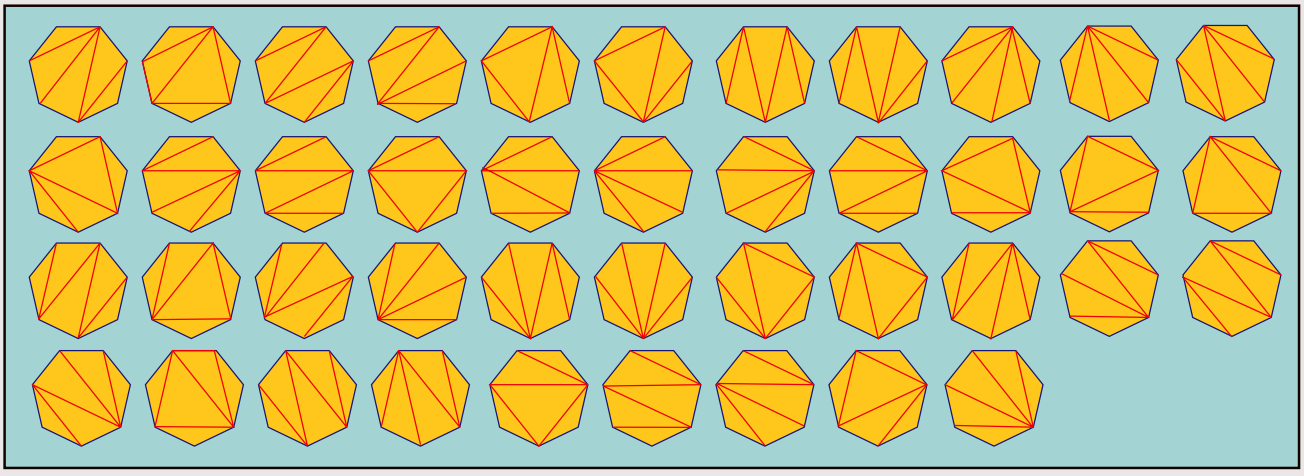
c



d



e



© Pour la Science

> version de l'ordinateur est la Terre… et pour connaître la suite, il vous faudra lire les ouvrages d'Adams.

Ce choix par l'auteur du nombre 42 est devenu un élément central de la culture *geek*. Il est à l'origine d'une multitude de plaisanteries ou de clins d'œil échangés entre initiés. Si par exemple vous demandez à votre moteur de recherche (en français ou en anglais) quelle est la réponse à la « grande question sur la vie, l'univers et le reste », il vous répondra très probablement : « 42 ». C'est par exemple le cas pour Google, pour Qwant, pour Wolfram Alpha spécialisé dans les problèmes de calculs mathématiques, mais aussi pour l'assistant de dialogue Clerverbot.

Des établissements privés d'enseignement informatique « écoles 42 » ont été créés à partir de 2013 et leur nom a clairement été choisi en référence aux romans de Douglas Adams. Le développement à l'étranger de nouveaux « campus 42 » est prévu à raison de dix par an. Le nombre 42 apparaît aussi sous différentes formes dans le film *Spider-Man: New Generation*. Vous trouverez répertoriées une multitude d'autres occurrences volontaires et allusions à 42, par exemple dans l'article « La grande question sur la vie, l'univers et le reste » de Wikipédia.

Plus bizarrement, mais cette fois ce sont des coïncidences dont il serait vain de rechercher le sens, il a été remarqué, parmi bien d'autres choses, que :

– dans l'Égypte antique, durant le jugement de l'âme, le mort devait déclarer devant 42 juges ne pas avoir commis 42 péchés [*voir l'article « Jugement de l'âme (Égypte antique) » de Wikipédia*] ;

– la distance à parcourir lors d'un marathon est 42,195 kilomètres, car c'est la distance que le messager grec Philippidès a parcourue en 490 avant notre ère entre Marathon et Athènes pour annoncer la victoire contre les Perses. Le fait qu'à cette époque le kilomètre n'était pas défini ne doit qu'accroître notre étonnement ;

– il y aurait eu 42 empereurs tibétains anciens. Nyatri Tsenpo, qui régna vers 127 avant notre ère, fut le premier, et Langdarma, qui régna de 836 à 842, le dernier (*voir l'article « List of emperors of Tibet » de Wikipedia*) ;

– la Bible de Gutenberg, premier livre imprimé en Europe, comporte 42 lignes de texte par colonne et est d'ailleurs dénommée « Bible latine à quarante-deux lignes » ;

– dans l'actualité, 42 est le nombre de régimes de retraite qui seront réformés en France (www.monde-diplomatique.fr/2019/05/MARTY/59866).

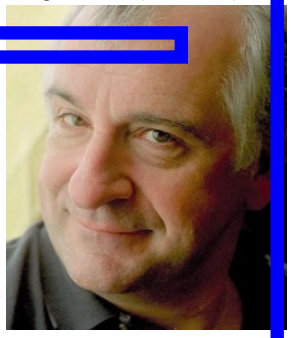
UN CHOIX ARBITRAIRE

La question de savoir si l'utilisation de 42 dans le roman de Douglas Adams avait dans son esprit un sens particulier lui a bien sûr été posée. Sa réponse est sans appel : « C'était une plaisanterie. Ce devait être un nombre ordinaire et plutôt petit, et j'ai choisi celui-ci. Les représentations binaires, la base 13, les machines tibétains ne sont que des balivernes. Je me suis assis à mon bureau, j'ai regardé dans le jardin et je me suis dit "42 ira" et je l'ai écrit. »

L'évocation de la base 2 provient de ce que 42 s'écrit dans le système binaire 101 010, ce qui est assez simple et a d'ailleurs eu pour conséquence que certains *geeks* ont fait la fête le 10 octobre 2010 (10-10-10). L'évocation de la base 13 dans sa réponse s'explique d'une manière plus indirecte. À plusieurs reprises, le roman évoque que 42 serait la réponse à la

2 L'HISTOIRE DE DOUGLAS ADAMS

Douglas Adams (1952-2001)



© Michael Hughes - Wikipédia

Voici l'extrait du chapitre 27 du roman de Douglas Adams, *Le Guide du routard [ou voyageur] galactique*, où apparaît le fameux nombre 42 devenu fétiche des *geeks* et plus généralement des informaticiens du monde entier :

« Tu es prêt à nous la fournir ? insista Debilgios.

— Maintenant ?
— Maintenant, confirma Pensées Profondes.
Ils humectèrent tous les deux leurs lèvres desséchées.
— Bien que, ajouta Pensées Profondes, je ne pense pas qu'elle vous plaise.
— Pas d'importance ! dit Schnocdlu. Nous devons la connaître. Maintenant.
— Maintenant ? insista Pensées Profondes.
— Oui ! Maintenant…
— D'accord, dit l'ordinateur, qui retomba dans le silence.
Les deux hommes ne tenaient plus en place. La tension était proprement insoutenable.
— Elle ne va franchement pas vous plaire, observa Pensées Profondes.
— Dis-la-nous quand même !
— D'accord, dit Pensées Profondes. La réponse à la grande Question…
— Oui… !
— De la Vie, de l'Univers et du Reste…, poursuivit Pensées Profondes.
— Oui… !
— C'est…, dit Pensées Profondes, marquant une pause.
— Oui… !?
— C'est…
— Oui… !!!… ?
— Quarante-deux, dit Pensées Profondes, avec infiniment de calme et de majesté. »

3

LA CONJECTURE DES SOMMES DE TROIS CUBES

D[illegible] positif le plus petit et le seul inférieur à 100 pour lequel on ignorait s'il était somme de trois cubes d'entiers.

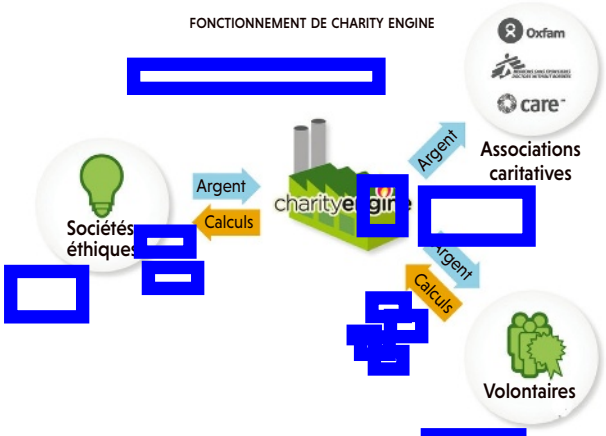
de Bristol, en Angleterre, et Andrew [illegible], aux États-Unis, ont utilisé le système de calcul Charity Engine pour mener un énorme calcul d'exploration équivalent à plus de 1 million d'heures de calcul d'un ordinateur de bureau courant. Une solution a été trouvée :
$42 = (-80\,538\,738\,812\,075\,974)^3 + 80\,435\,758\,145\,817\,515^3 + 12\,602\,123\,297\,335\,631^3$.

Le système de calcul Charity Engine coordonne plus de 500 000 machines personnelles de volontaires. Il les fait fonctionner pendant les moments où elles sont inutilisées, ce qui permet de réaliser d'énormes calculs à moindre coût. Charity Engine est fondé sur un programme de l'université de Berkeley et géré par la société Worldwide Computer Company.

La puissance informatique domestique résiduelle des ordinateurs du projet est vendue aux universités et aux entreprises. Les bénéfices sont versés à des associations caritatives ou servent à organiser des tirages au sort périodiques pour récompenser les participants au réseau. La puissance de calcul non achetée est attribuée à des projets informatiques divers.

La même méthode a aussi conduit à découvrir une expression inattendue de 3 comme somme de trois cubes :
$3 = (-472\,715\,493\,453\,327\,032)^3 + (-569\,936\,821\,113\,563\,493\,509)^3 + 569\,936\,821\,221\,962\,380\,720^3$.

Les seuls entiers inférieurs à 1 000 dont on ignore maintenant s'ils sont somme de trois cubes sont 114, [illegible], 579, [illegible].



[illegible] ? ». B[illegible] c'est absurde, puisque $6\times9=54$, mais justement, en base 13, le nombre s'écrivant 42 vaut $4\times13+2=54$.

À côté des occurrences introduites volontairement par les informaticiens pour s'amuser, et les rencontres inévitables avec le nombre 42 quand on cherche un peu partout dans l'histoire ou dans le monde, on peut quand même se demander si 42 est un nombre particulier au strict point de vue des mathématiques.

MATHÉMATIQUEMENT SINGULIER ?

Voici une liste de quelques propriétés mathématiques de 42.

• 42 est la somme des trois premières puissances de 2 d'exposant impair ($2^1+2^3+2^5=42$). La suite $a(n)$ des sommes de puissances impaires de 2 est la suite A020988 de l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane (https://oeis.org). En base 2, son n-ième élément s'écrit 1010...10, avec « 10 » répété n fois, et sa formule est $a(n)=(2/3)(4^n-1)$. Quand n augmente, la fréquence de ces nombres tend vers zéro, ce qui signifie que les nombres qui appartiennent à cette liste, donc 42 lui-même, sont exceptionnellement rares.

• 42 est la somme des deux premières puissances de 6 d'exposant non nul ($6^1+6^2=42$). La suite $b(n)$ des sommes de puissances de 6 est la suite A105281 de l'encyclopédie de Sloane. Elle est définie par les formules $b(0)=0$, $b(n)=6b(n-1)+6$. La fréquence de ces nombres tend aussi vers 0 à l'infini.

[illegible] de Catalan. Les nombres de Catalan *(voir l'encadré 1)* ont été mentionnés, sous un autre nom, pour la première fois par Leonhard Euler, qui voulait connaître le nombre de façons différentes de découper en plusieurs triangles un polygone convexe à n côtés en joignant des sommets par des segments de droite. Le début de la suite (A000108 chez Neil Sloane) est 1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, ... La formule $c(n)=(2n)!/(n!\,(n+1)!)$ donne le n-ième terme de cette suite de nombres dont la densité, comme celles des deux précédentes, est nulle à l'infini.

Les nombres de la suite $c(n)$ sont nommés en l'honneur du mathématicien franco-belge Eugène Charles Catalan (1814-1894), qui découvrit que $c(n)$ est le nombre de façons de disposer n paires de parenthèses en respectant les règles habituelles d'écriture des parenthèses : jamais une parenthèse n'est fermée avant d'avoir été ouverte, et on ne peut fermer une parenthèse que lorsque toutes celles ouvertes depuis qu'elle a été ouverte sont elles-mêmes fermées.

Par exemple, $c(3)=5$ car les dispositions possibles de 3 paires de parenthèses sont : ((())) ; ()()() ; (())() ; (()()) ; ()(()).

Le nombre $c(n)$ est également le nombre d'arbres binaires portant $n+1$ feuilles. C'est aussi le nombre de trajets montants sur un quadrillage situés sous la première diagonale *(voir l'encadré 1, b)*. Cette propriété permet de comprendre la définition par récurrence des termes de la suite de Catalan, $c(0)=1$ et $c(n+1)=\sum c(k)c(n-k)$, la somme portant sur les k allant de 0 à n. En effet, pour dénombrer le nombre de chemins >

> allant jusqu'à l'abscisse $n+1$, on considère un point intermédiaire le plus bas possible qui touche la diagonale; ceux avant (strictement en dessous de la diagonale) donnent $c(-)$, ceux après (en dessous au sens large de la diagonale) donnent $c(k)$.

– 42 est un nombre «pratique», ce qui veut dire que tout entier compris entre 1 et lui-même est somme de certains de ses diviseurs (distincts). Les premiers nombres pratiques sont 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 18, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 40, 42, 48, 54, 56, 60, 64, 66, 72 (suite A005153 de Neil Sloane). On ne connaît aucune formule simple donnant le n-ième terme de cette suite, et la fréquence limite de ses termes semble cette fois positive.

Tout cela est amusant, mais il est faux de dire que 42 est vraiment exceptionnel sur le plan mathématique. Les nombres 41 ou 43, par exemple, appartiennent eux aussi à de nombreuses séries. Pour explorer ces questions, utilisez le lien https://fr.wikipedia.org/wiki/42_(nombre) en y remplaçant 42 par le nombre qui vous intéresse.

Le problème de savoir quels nombres sont plus particulièrement intéressants ou plus particulièrement inintéressants a été étudié par Nicolas Gauvrit, Hector Zénil et moi-même en partant des suites répertoriées par Neil Sloane dans son encyclopédie. Outre un lien théorique avec la complexité de Kolmogorov (les nombres intéressants sont ceux disposant au moins d'une description brève), il a été montré un effet culturel spécifique pour les nombres retenus par l'encyclopédie de Neil Sloane, qui est donc autre chose qu'une encyclopédie fondée sur une pure objectivité mathématique (*voir la bibliographie*).

DU NOMBRE 42 AU PROBLÈME DES SOMMES DE TROIS CUBES !

Les informaticiens et mathématiciens savent l'attrait du nombre 42 et ont toujours pensé que c'était un simple jeu que l'on aurait pu tout aussi bien mener avec un autre nombre. Reste tout de même un élément récent d'actualité qui les a beaucoup amusés. Le nombre 42 a réellement donné beaucoup plus de fil à retordre que tous les autres nombres inférieurs à 100 dans le problème des 3 cubes.

Le problème des 3 cubes s'énonce ainsi: *Quels sont les nombres entiers n que l'on peut écrire sous la forme d'une somme de trois cubes de nombres entiers, $n=a^3+b^3+c^3$? Et, quand c'est le cas, comment trouver a, b et c?*

La difficulté, même sur un plan pratique pour mener des calculs, provient de ce que, pour un n donné, l'espace des triplets à explorer fait intervenir des nombres entiers négatifs. Cet espace est donc infini, ce qui n'est pas le cas quand on s'intéresse aux sommes de carrés: dans une telle somme de carrés donnant n, chaque carré a une valeur absolue inférieure à $\sqrt{n}$. D'ailleurs, pour les sommes de carrés, on sait parfaitement ce qui est possible et impossible (*voir l'encadré 4*).

Dans le cas des cubes, on trouve des solutions inattendues très grandes, comme celle pour 156, découverte en 2007:
$156=265771108075693^3+(-1816109335805)^3+(-23381515025762)^3$.

La première chose à noter pour qui s'intéresse aux sommes de trois cubes est que pour certaines valeurs de l'entier n, l'équation $n=a^3+b^3+c^3$ n'a pas de solution. C'est le cas pour tous les entiers n de la forme $9m-4$ et $9m+5$ (par exemple 4, 5, 13, 14, 22, 23…). La démonstration de cette affirmation est assez simple. On utilise le calcul «modulo 9», qui revient à supposer que 9=0 et à ne manipuler que des nombres entre 0 et 8 ou entre −4 et +4.

On constate d'abord que: $0^3=0 \pmod 9$; $1^3=1 \pmod 9$; $2^3=8=-1 \pmod 9$; $3^3=27=0 \pmod 9$; $4^3=64=1 \pmod 9$; $5^3=(-4)^3=-64=-1 \pmod 9$; $6^3=(-3)^3=0 \pmod 9$; $7^3=(-2)^3=1 \pmod 9$; $8^3=(-1)^3=-1 \pmod 9$.

Autrement dit: modulo 9, le cube d'un nombre entier vaut soit −1 (−8), soit 0, soit 1. Or l'addition de trois nombres choisis parmi 0, 1 et −1 donne:

LES SOMMES DE CARRÉS

On sait seulement depuis septembre 2019 que le nombre 42 est la somme de trois cubes. Les sommes maîtriser à cause des entiers négatifs. En revanche, les sommes de carrés de nombres entiers, qui intéressent les mathématiciens depuis l'Antiquité, sont maintenant parfaitement connues. Voici rappelés les résultats à leur sujet.

Sommes de deux carrés
– Un nombre premier impair est somme de deux carrés de nombres entiers si et seulement s'il est de la forme $4k+1$. La décomposition en somme de deux carrés est alors unique. Exemples: $5=1^2+2^2$, $13=2^2+3^2$, $17=1^2+4^2$.
– Un entier n est somme de deux carrés si et seulement si chacun de ses facteurs premiers de la forme $4k+3$ intervient avec un exposant pair dans la décomposition en facteurs premiers de n.
Exemple: $45=3^2 5=6^2+3^2$. La décomposition de 45 en facteurs premiers fait intervenir 3, qui est de la forme $4k+3$, avec un exposant pair. Le nombre 45 satisfait donc la condition du théorème et s'écrit effectivement comme somme de deux carrés *(voir* https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorème_des_deux_carrés_de_Fermat*).*
Sommes de trois carrés
– Tous les nombres entiers sauf ceux de la forme 3^{2n} et $8n+7$ sont des sommes de trois carrés *(voir* https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorème_des_trois_carrés*).*
Sommes de quatre carrés
Tout nombre entier est somme de quatre carrés. Ce magnifique théorème fut démontré en 1770 par Lagrange et redémontré en 1772 par Euler *(voir* https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorème_des_quatre_carrés_de_Lagrange*).*



Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813), gravure d'Antonio Dalcò.

© Wellcome Collection CC BY 4.0

$0=0+0+0=0+1+(-1)$; $1=1+0+0=1+1+(-1)$; $2=1+1+0$; $3=1+1+1$; $6=-3=(-1)+(-1)+(-1)$; $7=-2=(-1)+(-1)+0$; $8=-1=(-1)+0+0=1+(-1)+(-1)$.

On n'obtient jamais 4 ou 5 ($=-4$). Cela signifie que les sommes de trois cubes ne sont jamais des nombres de la forme $9m+4$ ou $9m+5$. Nous dirons que $n=9m+4$ et $n=9m+5$ sont des valeurs interdites.

LA RECHERCHE DES SOLUTIONS, EN PRATIQUE

Pour illustrer à quel point la recherche des solutions de l'équation $n=a^3+b^3+c^3$ est délicate, indiquons ce qui se passe pour $n=1$ et $n=2$.

Pour $n=1$, il y a la solution évidente $1^3+1^3+(-1)^3=1$.

En existe-t-il d'autres? Oui:

$9^3+(-6)^3+(-8)^3 = 729+(-216)+(-512) = 1$.

Ce n'est pas la seule, car, en 1936, le mathématicien allemand Kurt Mahler a proposé une infinité de solutions. Pour tout entier p:

$$(9p^4)^3+(3p-9p^4)^3+(1-9p^3)^3 = 1.$$

On prouve le résultat en utilisant l'identité remarquable: $(A+B)^3 = A^3+3A^2B+3AB^2+B^3$.

Un ensemble infini de solutions est aussi connu pour $n=2$: il a été découvert en 1908 par un certain A. S. Werebrusov. Pour tout entier p:

$$(6p^3+1)^3 + (1-6p^3)^3+(-6p^2)^3 = 2.$$

En multipliant chaque terme de ces égalités par le cube d'un entier x^3, on en déduit qu'il existe aussi une infinité de solutions pour tout cube d'un entier et tout double du cube d'un entier.

Pour 16 par exemple, qui est le double du cube de 2, on a: $14^3+(-10)^3+(-12)^3 = 16$.

Indiquons encore que pour $n=3$, on ne connaissait en août 2019 que deux solutions:

$1^3+1^3+1^3 = 3$ et $4^3+4^3+(-5)^3 = 3$.

Vient alors naturellement à l'esprit la question: existe-t-il des solutions pour toutes les valeurs non interdites de n?

LES ORDINATEURS AU TRAVAIL

Pour répondre, on a commencé par prendre la suite des valeurs non interdites 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, ... (A060464 de Neil Sloane) en les étudiant une par une. Si aucune de celles étudiées ne se révèle impossible, on aura des raisons de conjecturer que pour tout entier n qui n'est pas de la forme $n=9m+4$ ou $n=9m+5$, il existe des solutions à l'équation $n=a^3+b^3+c^3$.

Les recherches menées, en fonction de la puissance des ordinateurs ou réseaux d'ordinateurs utilisés, ont donné une série de résultats de plus en plus nombreux. Ce sont eux qui vont à nouveau nous mener au fameux et intrigant nombre 42.

En 2009, Andrea-Stephan Elsenhans et Jörg Jahnel, utilisant une méthode proposée par Noam Elkies en 2000, ont exploré tous les triplets a, b, c d'entiers de valeur absolue inférieure à 10^{14} pour rechercher les solutions pour n compris entre 1 et 1000. Leur article concluait que la question de l'existence d'une solution pour les nombres inférieurs à 1000 restait ouverte uniquement pour 33, 42, 74, 114, 165, 390, 579, 627, 633, 732, 795, 906, 921, et 975.

Pour les entiers inférieurs à 100, seules trois énigmes subsistaient donc: 33, 42 et 74.

En 2016, Sander Huisman poussa un peu plus loin l'exploration et trouva une solution pour 74:

$(-284650292555885)^3+(66229832190556)^3+(283450105697727)^3$.

Restaient alors seulement 33 et 42 pour les n inférieurs à 100. En mars 2019, Andrew Booker régla le cas de 33: $(8866128975287528)^3+(-8778405442862239)^3+(-2736111468807040)^3$.

Dès lors, le nombre de Douglas Adams était le dernier entier positif et inférieur à 100 pour lequel on ignorait s'il pouvait s'écrire comme une somme de trois cubes d'entiers.

Si la réponse avait été négative, on aurait eu une raison mathématique vraiment sérieuse de donner de l'importance à 42; il aurait été le premier nombre possiblement somme de trois cubes qui ne l'aurait pas été. Les ordinateurs ont peiné, mais ils ont déçu ce bref espoir (*voir l'encadré 3*).

La réponse est venue en septembre 2019. Ce fut le résultat d'un calcul faramineux donné par Andrew Booker et Andrew Sutherland. Des ordinateurs participant au réseau Charity Engine d'ordinateurs personnels calculant pendant l'équivalent de plus de 1 million d'heures découvrirent que:

$42 = (-80538738812075974)^3 + 80435758145817515^3+12602123297335631^3$

Les cas des entiers 165, 795 et 906 ont été aussi résolus récemment. Il ne reste donc que les cas de 114, 390, 579, 627, 633, 732, 921 et 975 à régler pour les entiers inférieurs à 1000.

La conjecture qu'il existe des solutions pour tous les n qui ne sont pas de la forme $9m+4$ ou $9m+5$ semble donc se confirmer. En 1992, Roger Heath-Brown a proposé une conjecture plus forte affirmant que pour tous les n envisageables, il existe une infinité de façons de les écrire comme somme de trois cubes. Le travail est donc loin d'être terminé.

La difficulté du problème apparaît énorme, ce qui fait envisager que le problème «n est-il une somme de trois cubes?» pourrait être indécidable. Autrement dit, il se pourrait qu'aucun algorithme, aussi astucieux soit-il, ne soit capable de traiter tous les cas possibles. C'est le cas pour l'arrêt des programmes, Alan Turing ayant montré en 1936 qu'aucun algorithme ne peut les traiter tous. Mais ici, nous sommes dans un domaine purement numérique très simple à énoncer, et donc si l'on arrivait à prouver une telle indécidabilité, ce serait une nouveauté.

Le nombre 42 était difficile, mais ce n'était qu'une étape! ■

BIBLIOGRAPHIE

[illegible] solve '42' problem with planetary supercomputer, *Science Alert*, 9 sept. 2019 (https://bit.ly/2EsKZES).

R. F. Mandelbaum, **[illegible] Stumped By the Number 3**, *Gizmodo*, 19 sept. 2019 (https://bit.ly/2Sbqgdf).

A. Booker, **Cracking the problem with 33**, *Res. Number Theor.*, 18 mai 2019 (https://arxiv.org/pdf/1903.04284.pdf).

N. Gauvrit *et al.*, **Sloane's gap: Mathematical and social factors explain the distribution of numbers in the OEIS**, *Journal of Humanistic Mathematics*, vol 3(1), pp. 3-19, 2013 (https://arxiv.org/pdf/1101.4470).

N. Gauvrit *et al.*, **Le passé de Sloane**, *Mathématiques et sciences humaines / Mathematics and social sciences*, vol. 194, pp. 5-17, 2011) (https://journals.openedition.org/msh/pdf/12014).

A.-S. Elsenhans et J. Jahnel, **New sums of three cubes**, *Mathematics of Computation*, vol. 78 (266), pp. 1227-1230, 2009.

D. Adams, **The Hitchhiker's Guide to the Galaxy**, Pan Books, 1979 ; **Le Guide du routard galactique**, Denoël, 1982.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
[illegible]

CALANQUES ANNÉE ZÉRO

À l'occasion d'une commande publique, le photographe Nicolas Floc'h dresse le portrait détaillé des fonds marins du Parc national des Calanques : un état zéro indispensable pour mieux préserver le site.



L'anse de l'Arène, à Cassis, par 4 mètres de profondeur.

© Nicolas Floc'h

Entre Marseille et Cassis, sur près de 20 kilomètres de côtes, s'étendent les Calanques, une succession d'anses et de criques creusées à l'aplomb d'un massif montagneux dans lequel se niche en particulier la grotte Cosquer, dont l'entrée est aujourd'hui au-dessous du niveau de la mer. Par bateau ou sur les nombreux chemins de randonnée, le site est parcouru chaque année par des millions de visiteurs, intense fréquentation qui fragilise l'écosystème tout entier. D'autres menaces pèsent plus encore sur la préservation du site, notamment les rejets en mer de boues rouges, les déchets (oxydes de fer, soude caustique, métaux lourds…) de l'usine Alteo Gardanne, où de l'aluminium est extrait de la bauxite.

Pour faire face à ces dangers, les Calanques sont depuis 2012 protégées grâce à la création du Parc national des Calanques. L'établissement public est aidé en cela par la fondation Camargo, installée à Cassis, et par l'Observatoire des sciences de l'Univers (l'institut Pytheas). Ensemble, et avec le soutien du ministère de la Culture, ils viennent de passer une commande publique artistique auprès du photographe Nicolas Floc'h. Il s'agit pour lui de réaliser son projet *Invisible*, développé lors de la résidence artistique « Calanques, territoire de sciences, source d'inspiration », proposée par les trois structures partenaires.

L'objectif est de dresser grâce à ces photographies un état zéro des fonds marins des Calanques en suivant l'ensemble du trait de côte, soit 162 kilomètres. Les images obtenues, grâce auxquelles les acteurs de la préservation des Calanques pourront suivre l'évolution du milieu, seront en noir et blanc, prises en lumière naturelle et au grand-angle. Pourquoi un tel parti pris ? L'idée est d'échapper aux stéréotypes de la photographie sous-marine classique, qui privilégie trop souvent, selon Nicolas Floc'h, le spectaculaire et une représentation scénarisée et artificielle des fonds marins. Là, l'approche panoramique des paysages montre la mer telle qu'elle s'offre au regard et prend en compte la dimension verticale, celle de la colonne d'eau, le long de laquelle le point de vue varie.

Cette volonté de réalisme semble paradoxale tant les clichés déjà réalisés



(*voir la photographie*) semblent tendre vers l'abstraction. C'était déjà le cas d'une série précédente, *La Couleur de l'eau*, où ce qui s'apparente à des monochromes bleus, verts ou rouges… renvoie en fait à la composition concrète du milieu marin (sédiments, plancton, matières détritiques…) conférant à l'eau sa turbidité et sa couleur. Le paradoxe n'est donc qu'apparent. Cette turbidité est aux yeux de Nicolas Floc'h l'un des traits essentiels de son travail photographique: c'est elle qui marque l'horizon et les contours des paysages sous-marins. Le choix du noir et blanc permet justement au photographe de travailler sur la densité créée par la turbidité et sur l'imaginaire, rendant au final les images plus simples d'accès, moins exotiques que lorsqu'elles sont saturées de couleurs. L'immersion en est facilitée.

Le projet *Invisible* s'inscrit dans un programme plus ambitieux mené par l'artiste: photographier les grandes typologies de paysages sous-marins français, à partir de l'exploration des différentes façades maritimes, et de les mettre en perspective face au changement climatique et aux pressions anthropiques.

La commande sera présentée au public lors de la biennale européenne itinérante Manifesta 13 et à l'occasion du Congrès mondial de la Nature, qui tous deux se tiendront à Marseille en juin 2020. Par ailleurs, l'ensemble de l'œuvre de Nicolas Floc'h sera l'objet de l'exposition « Paysages productifs », au FRAC Provence-Alpes-Côte d'Azur du 6 juin au 13 septembre 2020. ■

Pour plus d'informations :
nicolasfloch.net
fracpaca.org

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

FROID OU CHAUD AU TOUCHER ?

Notre peau est sensible aux variations de température. Or celles-ci dépendent notamment de la nature des matériaux que nous touchons.



Lorsque nous marchons pieds nus dans une maison dont la température ambiante est de 20 °C, le carrelage de la salle de bain paraît toujours plus froid que le parquet, en bois, du salon. Pourtant, ces surfaces sont toutes deux à la même température…

D'où vient cette différence de sensation ? Elle résulte de l'échange de chaleur entre notre pied et le sol, et de la façon dont nous percevons la température avec notre peau. Et contrairement à ce qui est souvent affirmé, la conduction thermique des matériaux ne suffit pas à tout expliquer.

CONDUCTION THERMIQUE ET CAPACITÉ CALORIFIQUE SE CONJUGUENT

Quelles sont les grandeurs physiques en jeu ? Commençons par chauffer un matériau, initialement à température ambiante, en contrôlant la puissance qu'il reçoit, par exemple en exposant à la lumière du soleil un objet noirci.

Au début, l'élévation de la température de sa surface directement exposée dépend de la capacité calorifique par unité de volume de l'objet. Pour une même énergie absorbée, plus la capacité calorifique est grande et moins la hausse de température est importante : le matériau peut emmagasiner facilement l'énergie reçue.

Ensuite, comme cet échauffement conduit à un écart de température entre la surface et le cœur de l'objet, il apparaît au sein du matériau un flux de chaleur, par conduction. C'est là qu'intervient une seconde grandeur : la conductivité thermique. Plus celle-ci est élevée, plus le transfert de chaleur est rapide.

Le flux de chaleur qui quitte la surface vers l'intérieur du matériau contrarie le stockage de chaleur au voisinage de la surface : ainsi, l'élévation de température à la surface sera faible si la capacité calorifique (stockage) et la conductivité thermique (conduction) sont élevées. Le calcul montre que la hausse de température dépend d'une seule grandeur : l'« effusivité », égale à la racine carrée du produit de la capacité calorifique volumique par la conductivité thermique.

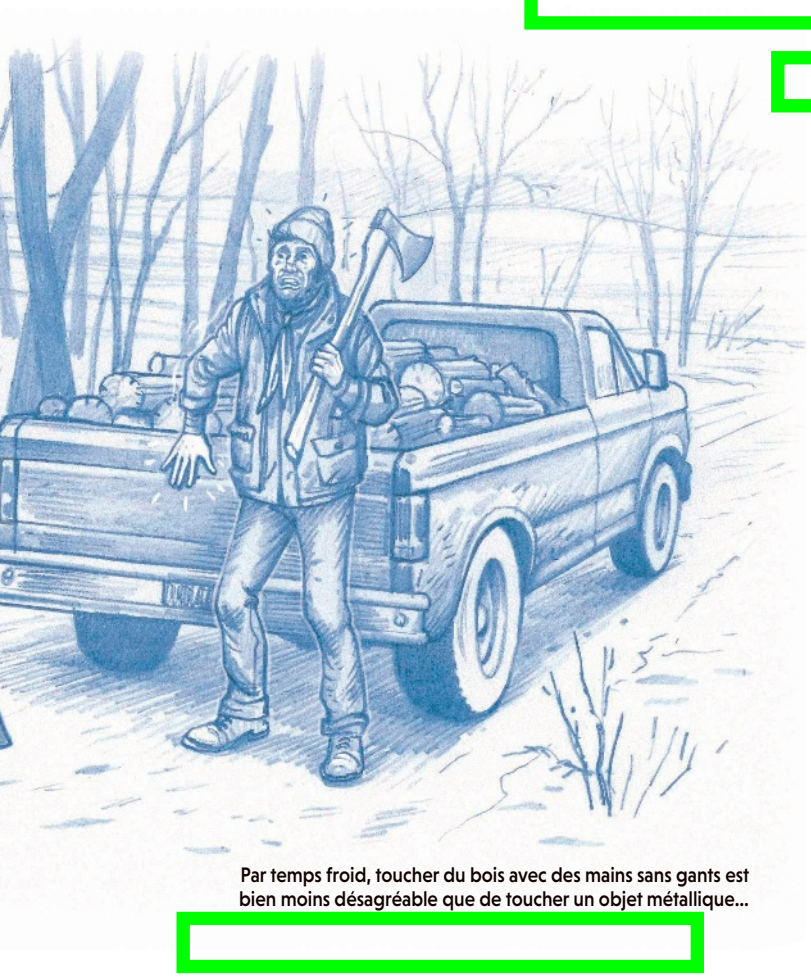
L'effusivité traduit *in fine* l'aptitude d'un matériau à absorber ou à restituer de l'énergie thermique. Elle joue un rôle essentiel dans de multiples situations, notamment quand on apporte brutalement de l'énergie thermique (trempe des métaux et tous les procédés de soudage ou d'usinage par exemple).

Que se passe-t-il quand nous marchons pieds nus ou saisissons des objets ? Dans ces situations, il n'y a pas de contrôle de la puissance chauffante, mais une mise en contact de deux corps de températures différentes. L'application des lois de la thermodynamique conduit à un résultat remarquable : la température

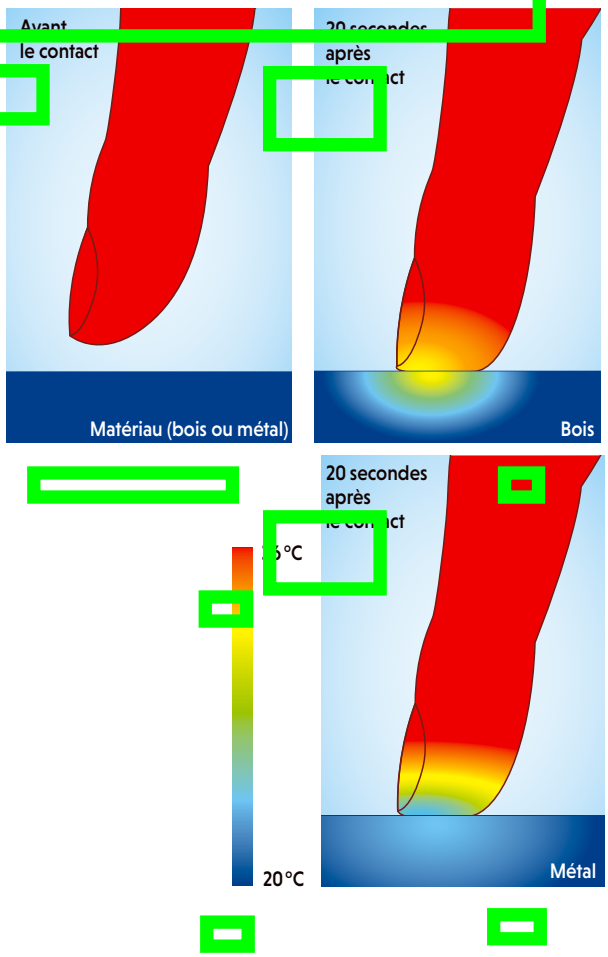
© Illustrations de Bruno Vacaro

TEMPÉRATURE AU POINT DE CONTACT

La sensation thermique produite lorsque le doigt, qui est à environ 36 °C, touche une surface en bois à 20 °C n'est pas du tout la même que lorsqu'il touche une surface métallique, également à 20 °C. La température au point de contact est la moyenne des températures de la peau et de la surface touchée, pondérées par l'effusivité du matériau respectif. L'effusivité de la peau étant d'environ 1 500 unités du Système international et celle du bois étant d'environ 500 unités, la température au contact doigt-bois est d'environ 32 °C. L'effusivité d'un métal comme l'inox étant de 8 000 unités, la température au contact doigt-métal est d'environ 22,5 °C. Cela explique en partie pourquoi le métal est perçu comme plus froid que le bois. Une explication plus complète demande de prendre en compte le flux de chaleur, qui est plus élevé entre la peau et le métal qu'entre la peau et le bois.



Par temps froid, toucher du bois avec des mains sans gants est bien moins désagréable que de toucher un objet métallique...



qui s'établit presque instantanément à l'interface des deux objets reste constante ensuite.

De plus, cette température est égale à la moyenne des températures des deux matériaux, pondérées par leurs effusivités. Cela signifie que le matériau de plus grande effusivité impose sa température au niveau du contact et que la variation de température en son sein reste faible.

Cette propriété semble expliquer nos sensations de chaud ou froid. La peau étant à une température voisine de 36 °C, elle est souvent plus chaude que les objets d'une habitation à température ambiante, disons 20 °C. Imaginons que nous saisissions à main nue pendant quelques secondes une barre en inox. Sachant que, dans les unités du Système international (SI), l'effusivité de la peau est d'environ 1500 tandis que celle de l'inox est de 8000, la température de contact sera de 22,5 °C. Et comme la conductivité thermique du métal est élevée, ce surcroît de 2,5 °C gagne rapidement le volume de la barre (*voir l'encadré ci-dessus*).

Avec du bois, dont l'effusivité est de 500 unités SI, la température de contact sera de 32 °C; mais comme la conductivité thermique de ce matériau est faible, seule une zone peu étendue autour du contact sera affectée dans un premier temps. En termes de température, il n'y a donc aucun doute: au contact avec le doigt, le bois est plus chaud que le métal.

Bien entendu, l'effet s'amplifie avec la différence de température: en plein hiver à –10 °C, la surface de l'inox serait à –3 °C, de quoi provoquer des gerçures, tandis que celle du bois serait à 24 °C.

Et l'effet est inverse lorsque les objets sont plus chauds que la peau. Dans un >

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

> sauna où la température ambiante atteint 90 °C, la température de contact serait de 81 °C avec l'inox et de 49 °C avec le bois. On comprend pourquoi les bancs des saunas sont en bois… Ce contraste est aussi apparent en plein été, où l'on évite fait de se brûler au contact d'une surface métallique exposée en plein soleil.

DES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE DUES AU FLUX THERMIQUE

La température de contact ne suffit toutefois pas à expliquer complètement nos sensations, pour au moins deux raisons. L'une est physique : la température de contact n'est pas celle qui règne à l'endroit où se trouvent nos cellules nerveuses thermosensibles. L'autre est physiologique : ces cellules ne sont pas des thermomètres.

Commençons par la physique. Tant que les températures des deux corps ne se sont pas égalisées dans tout leur volume, de la chaleur passe du corps chaud au corps froid. L'intensité de ce flux thermique dépend surtout du matériau ayant l'effusivité la plus faible : la main cède ainsi trois fois plus de chaleur à la barre de métal qu'au barreau en bois.

Il en serait de même, mais dans des proportions moindres, avec du carrelage (ou du marbre) et un parquet de bois. C'est aussi pour cela que, afin de décongeler rapidement un aliment, mieux vaut le placer sur une plaque dédiée, en aluminium épais, que sur une planche à découper en bois : le flux thermique sera multiplié par 4 et le temps de décongélation réduit.

Au flux thermique sont associées des variations de température à l'intérieur des corps en contact. Ces variations ne sont pas instantanées. Dans le cas de l'inox, par exemple, en 1 seconde, la variation de température se fait sentir jusqu'à 4 millimètres de profondeur. Mais dans du bois ou dans le doigt, cette distance est nettement inférieure au millimètre. Autrement dit, la température de nos cellules nerveuses situées sous l'épiderme, épais d'environ 1 millimètre, continue à évoluer durant les secondes qui suivent le contact.

Ensuite, l'une des caractéristiques importantes des cellules thermosensibles, sans entrer dans les détails de leurs divers types, est que ces cellules réagissent non pas à la température, mais à la vitesse de variation de cette dernière (*voir l'encadré ci-dessus*). Autrement dit, ce qui compte pour nos sensations, c'est la phase transitoire durant laquelle la température de notre derme évolue, soit quelques secondes. Le résultat est en accord avec la température de contact : plus celle-ci diffère de la température du doigt, plus la variation de la température à l'intérieur du doigt sera importante et plus la sensation de chaud ou de froid sera intense.

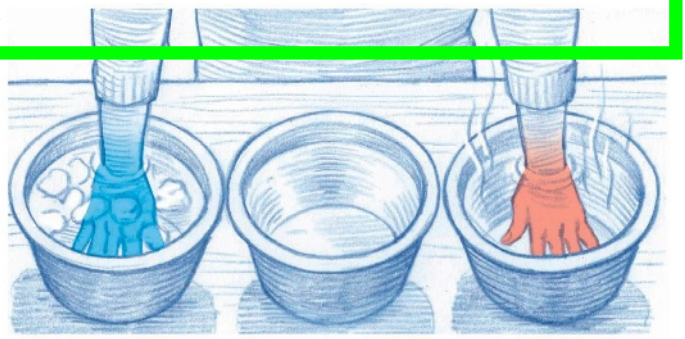
Ainsi, si les sensations de température au toucher du bois et du métal sont différentes, c'est parce que les changements de température induits dans notre doigt par le contact avec ces matériaux ne sont pas les mêmes. En fait, lorsque nous touchons un objet, nous sommes sensibles à une combinaison de sa température et de son effusivité, combinaison qui diffère d'un matériau à l'autre.

Ces sensations thermiques ont leur rôle dans le confort et le bien-être. Aussi les concepteurs de vêtements ou même les équipementiers pour l'aménagement intérieur des voitures font-ils de plus en plus attention aux valeurs de l'effusivité des matières utilisées dans leurs produits. ■

SENSIBILITÉ AUX VARIATIONS DE TEMPÉRATURE

Les cellules thermosensibles de la peau réagissent aux variations de température et non à la température elle-même. Une expérience simple et bien connue illustre ce fait. On commence par plonger la main gauche dans de l'eau chaude et la main droite dans de l'eau froide, et on attend un peu *(a)*. Puis on plonge les deux mains dans une eau tiède *(b)* ; les sensations sont alors inversées : la main gauche transmet une sensation de froid *(en bleu)*, tandis que la main droite transmet une sensation de chaud *(en rouge)*.

a



b



BIBLIOGRAPHIE

C. Krapez, **Mesure de l'effusivité thermique**, *Techniques de l'Ingénieur*, R 2957, septembre 2006 (https://bit.ly/2ZNrh6).

W. M. Bergmann Tiest et A. M. L. Kappers, **Tactile perception of thermal diffusivity**, *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 71, pp. 481-489, 2009.

A. Sarda *et al.*, **Heat perception measurements of the different parts found in a car passenger compartment**, *Measurement*, vol. 35(1), pp. 65-75, 2004.

© Bruno Vacaro

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !



N° 507 (jan. 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai. 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496

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

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

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

1e 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 À RÉGLER ..... €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20013, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814

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 commandés et choix en 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-fr. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR



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

LES CHÉTOGNATHES TROUVENT ENFIN LEUR PLACE !

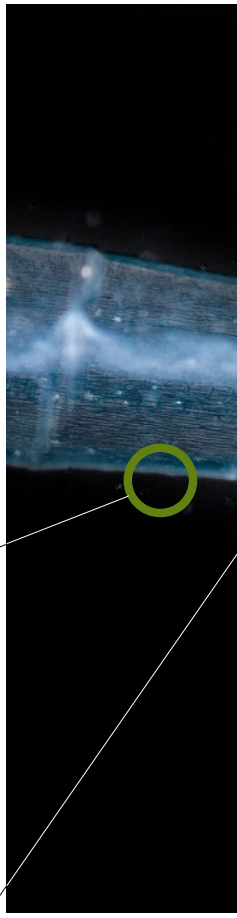
Avec leur tête chevelue et leur mâchoire fournie, les chétognathes ont longtemps été une énigme pour les zoologistes, qui peinaient à situer ces curieux vers marins dans la classification animale. Mais une solution est enfin apparue…

Les chétognathes ont longtemps été une énigme pour les zoologistes. Ces petits animaux marins transparents à symétrie bilatérale tiennent leur nom (du grec *khaitē*, « chevelure » et *gnathos*, « mâchoire ») de puissants crochets préhenseurs qui, de part et d'autre de leur tête renflée, donnent l'impression d'une chevelure. Des ailes de petites dents entourent par ailleurs la bouche. Les côtés portent des nageoires paires et l'extrémité postérieure est munie d'une nageoire caudale. Ces animaux de taille modeste (4 centimètres en moyenne) sont de redoutables prédateurs à la mesure empoisonnée qui se nourrissent de copépodes (petits crustacés), de petits poissons ou de… chétognathes. Pendant deux siècles, du fait de ces étranges attributs, les zoologistes ont échoué à les situer dans la classification animale. Mais récemment, des données issues du développement, de la phylogénie et de la paléontologie ont amené à la résolution du problème.

On doit au naturaliste hollandais Martinus Slabber la première représentation d'un chétognathe, en 1775. Mais ces animaux n'ont été étudiés qu'en 1824 à bord de l'*Astrolabe* durant l'expédition de Jules Dumont d'Urville, par les biologistes marins Jean René Quoy et Joseph Gaimard. Au cours des années suivantes, les zoologistes classent tour à tour les chétognathes près des annélides, des nématodes, des mollusques… À tel point qu'en 1844, Charles Darwin s'exclame qu'ils sont « remarquables par l'obscurité de leurs affinités ».

PROCHES DES CORDÉS ?

À la fin du XIXe siècle, les embryologistes allemands décrivent leur développement. Curieusement, ils observent que la bouche de l'embryon se forme secondairement. Or, à l'époque, sur des critères morphologiques et, surtout, embryologiques, les zoologistes séparent les bilatériens – les animaux à symétrie bilatérale – en deux grands taxons, les protostomiens (animaux à bouche



Les chétognathes ont une forme de torpille ou de flèche (on les nomme *arrow worms* en anglais).

Cette espèce commune de chétognathe des eaux peu profondes de la mer du Nord et des côtes fait partie des plus petites de ce groupe.

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

© Wolfgang Dibiasi - www.dibiasiwelt.com ; illustration de Dominique Visset, issue de G. Lecointre et H. Leguyader, Classification phylogénétique du vivant, Belin, 2016.

EN CHIFFRES

150

Jusqu'à présent, environ 150 espèces de chétognathes ont été décrites, [illegible] plutôt 250.

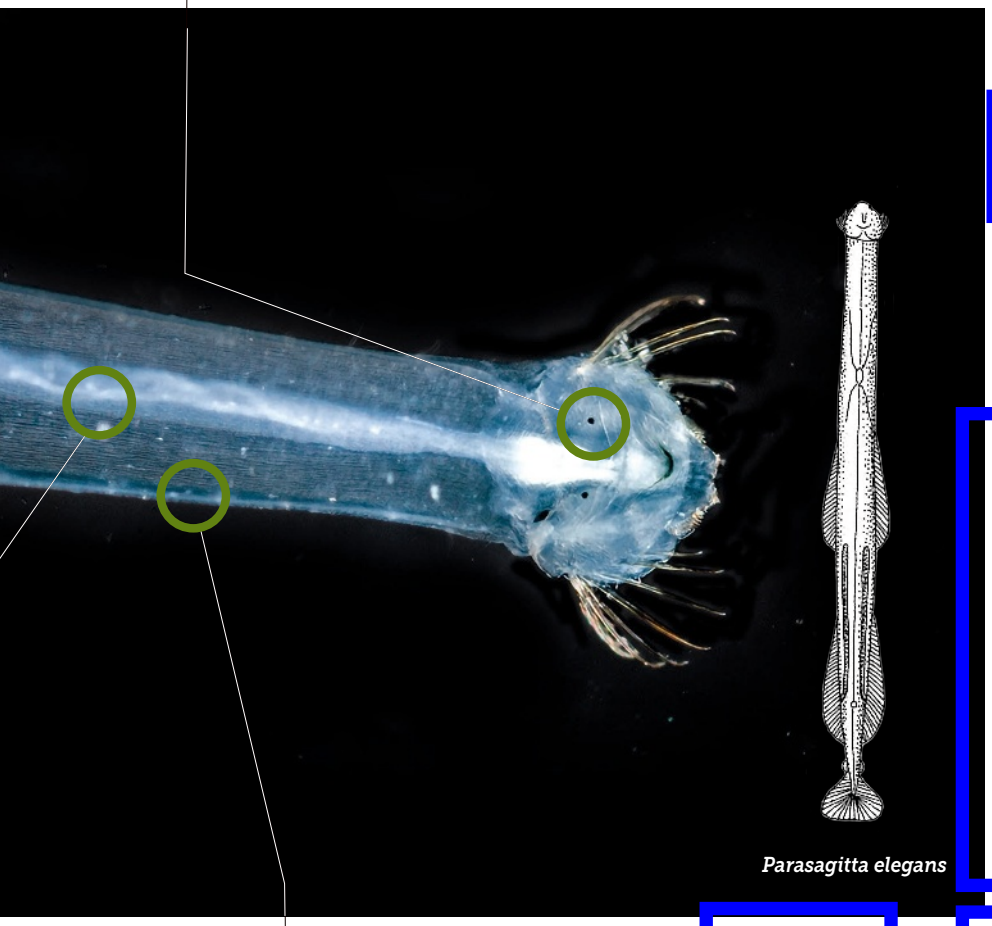
12 cm

Le plus grand chétognathe connu mesure 12 centimètres ; le plus petit, 2 millimètres. Les g[illegible]s les plus grands mesurent respectivement 1 et 3 millimètres. Les plus petits gnathostomulides et rotifères, quant à eux, ne dépassent pas 0,5 et 0,35 millimètre.

15 %

Présents surtout dans les eaux tropicales et tout le long de la colonne d'eau (certaines espèces sont benthiques), les chétognathes forment parfois jusqu'à 15 % de la masse du plancton marin.

Munie d'une paire d'yeux, la tête peut se couvrir d'un capuchon qui, enveloppant les crochets, améliore le comportement hydrodynamique de l'animal.



Parasagitta elegans

Chez cette espèce, les nageoires sont toutes situées sur la moitié postérieure (non visible) de l'animal.



Parasagitta setosa
Longueur maximale : 14 mm

formée premièrement) et les deutérostomiens (animaux à bouche formée secondairement). Les chétognathes sont donc classés dans les deutérostomiens, avec les échinodermes (oursins, étoiles de mer…) et les cordés, qui incluent les vertébrés. Et on les trouve toujours à cette place dans les traités de zoologie moderne, tels celui de 1959 de la zoologiste new-yorkaise Libbie Hyman ou celui des frères Brusca, dont la deuxième édition date de 2003. Pourtant, les chétognathes ont bien l'air de protostomiens, en particulier quand on observe l'organisation de leur système nerveux central, qui ressemble à celui d'un annélide ou d'un mollusque.

Au cours de la dernière décennie du XXe siècle, cependant, les phylogénies moléculaires (les études des liens de parenté des organismes *via* la comparaison de leurs séquences d'ADN) commencent à résoudre les multiples problèmes de la classification animale. La division entre deutérostomiens et protostomiens est validée et ces derniers se partagent en deux taxons : les ecdysozoaires, ou animaux à mue (arthropodes, nématodes…), et les spiraliens (appelés à l'époque « lophotrochozoaires »), animaux dont les premières divisions cellulaires de l'œuf suivent une segmentation spirale (annélides, mollusques…).

L'ÉTRANGE GROUPE DES GNATHIFÈRES

Or, dans cette nouvelle classification, les chétognathes se situent parmi les protostomiens, sans toutefois y trouver réellement leur place. En effet, ils sont la source d'un artéfact classique de reconstruction phylogénétique qui entraîne le regroupement de taxons non apparentés évoluant plus rapidement. De plus, à l'intérieur des spiraliens, c'est le bazar. Si certains regroupements paraissent solides, comme celui des annélides et des mollusques, nombre d'embranchements, comme les plathelminthes, se déplacent d'une branche à l'autre au gré des phylogénies.

Pas à pas, les zoologistes mettent de l'ordre dans les spiraliens en suivant deux directions. D'une part, ils passent >

> de la phylogénie moléculaire à la phylogénomique, c'est-à-dire l'utilisation de la plus grande fraction possible du génome – au mieux de son intégralité – pour réaliser des phylogénies plus fiables ; d'autre part, ils n'omettent pas pour autant l'anatomie comparée.

C'est alors que Martin Sørensen, de l'université de Copenhague, décrit en 2002 un animal microscopique, *Limnognathia maerski*, récemment découvert dans une île du Groenland. Ce dernier arbore un pharynx pourvu de mâchoires d'une extrême complexité, qui ressemblent à celles d'autres organismes microscopiques : les rotifères, des animaux planctoniques d'eau douce, et les gnathostomulides, de minuscules vers vivant dans les sables marins. Or en 1995, le zoologiste allemand Wilko Ahlrichs a rassemblé rotifères et gnathostomulides en un même taxon, les gnathifères (porteurs de mâchoires). *L. maerski* s'y rejoint donc, mais il faut attendre encore sept ans pour qu'une équipe allemande, autour de Thomas Hankeln, de l'université de Mayence, confirme par phylogénomique que ce groupe forme réellement un taxon. Les chétognathes feraient-ils eux aussi partie des gnathifères, malgré leur taille macroscopique ?

LES CHÉTOGNATHES, DES GNATHIFÈRES ?

Plusieurs indices récents vont dans ce sens. Dans les années 2000, autour de Yannick Le Parco, du centre d'océanologie de Marseille, une équipe s'était lancée dans l'étude des gènes de développement des chétognathes, en particulier les gènes *Hox*, qui spécifient l'organisation antéro-postérieure de l'organisme. De manière inattendue, l'un des six gènes répertoriés présentait une grande originalité : c'était un gène mosaïque, aux caractéristiques à la fois de gènes *Hox* connus pour organiser l'avant et le milieu des animaux, et d'autres gènes *Hox* connus pour organiser la partie postérieure. Or en 2017, Andreas Fröbius, de l'université de Giessen, en Allemagne, et Peter Funch, de l'université d'Aarhus, au Danemark, ont trouvé chez un rotifère un gène mosaïque identique ! Chétognathes et rotifères sont donc probablement des proches parents.

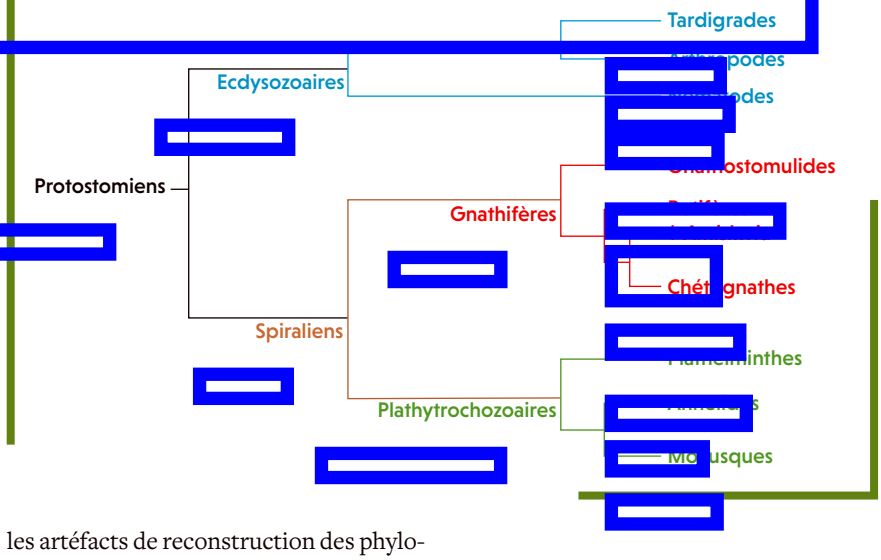
Puis, en 2019, une équipe de l'institut de science et technologie d'Okinawa, au Japon, autour de Ferdinand Marlétaz, a mené un travail très soigné de phylogénomique pour prendre en compte l'hétérogénéité de la composition des séquences nucléiques et minimiser ainsi les artéfacts de reconstruction des phylogénies. La résolution en a été largement améliorée et, ô surprise, les chétognathes se sont retrouvés… dans les gnathifères (*voir l'encadré ci-dessus*).

Ainsi, la découverte d'un nouveau taxon, les gnathifères, a résolu le mystère des chétognathes : ces animaux marins centimétriques appartiendraient bien à ce groupe, aux côtés de leurs minuscules cousins, les rotifères et les gnathostomulides. Comment une telle différence de taille est-elle possible chez des animaux si proches ? Un fossile a tout récemment fourni une réponse. En 2019, en effet, Jean-Bernard Caron et Brittany Chung, de l'université de Toronto, ont réinterprété *Amiskwia*, un fossile du Cambrien, il y a environ 500 millions d'années.

On avait d'abord vu ce fossile comme un chétognathe avant d'abandonner cette interprétation. Mais les deux chercheurs ont décelé des mâchoires en bon état dans son pharynx, mâchoires qui ressemblent profondément à celles des gnathostomulides… Ainsi, les gnathifères ont reçu un fossile de choix, qui prouve l'ancienneté du groupe. Or *Amiskwia* mesure quelques centimètres… Les gnathifères présentent donc une dynamique évolutive intéressante de miniaturisation. Si les chétognathes sont restés de taille centimétrique, les autres membres du groupe sont devenus minuscules. Qui aurait eu l'idée de classer des géants parmi des nains ? ■

LE NOUVEL ARBRE DES PROTOSTOMIENS

Après avoir côtoyé tour à tour annélides (sangsues, vers de vase, lombrics…), nématodes (vers non segmentés) et mollusques, les chétognathes font aujourd'hui partie d'un nouveau taxon, les gnathifères, aux côtés d'autres animaux marins ou d'eau douce comme les rotifères, les gnathostomulides et *Limnognathia maerski* (non représenté sur cet arbre simplifié). Hormis les chétognathes et le fossile *Amiskwia*, les gnathifères sont microscopiques.



BIBLIOGRAPHIE

F. Marlétaz *et al.*, **A new spiralian phylogeny places the enigmatic arrow worms among gnathiferans**, *Curr. Biol.*, vol. 29, pp. 312-318, 2019.

J.-B. Caron et B. Chung, **Amiskwia is a large Cambrian gnathiferan with complex gnathostomulid-like jaws**, *Commun. Biol.*, vol. 2, article 164, 2019.

A. Fröbius et P. Funch, **Rotiferan Hox genes give new insights into the evolution of metazoan bodyplans**, *Nat. Commun.*, vol. 8, article 9, 2017.

D. Papillon *et al.*, **Hox gene survey in the chaetognath *Spadella cephaloptera*: Evolutionary implications**, *Dev. Genes Evol.*, vol. 213, pp. 142-148, 2003.

© Pour la Science, d'après J. Vinther et L. A. Parry, Current Biology, vol. 29, pp. 881-888, 2019

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

PAG20STD

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

☐ FORMULE
PAPIER
• 12 n° du magazine papier
4,90€ PAR MOIS -29 %
OPV4E90

☐ FORMULE
PAPIER + HORS-SÉRIE
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
6,50€ PAR MOIS -31 %
OPV6E50

☐ FORMULE
INTÉGRALE
• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne
8,20€ PAR MOIS -43 %
OPV8E20

2 / Mes coordonnées

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

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

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

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte
Nom : .....
Adresse : .....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Ne rien inscrire

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

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

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

L'AUTEUR



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

DES ODEURS POUR CRÉER DES SAVEURS

Certaines odeurs sont associées à des saveurs, notamment salée ou sucrée. L'effet sert à réduire le sucre ou le sel, mais aussi à mieux cuisiner



Les odeurs florales évoquent une saveur sucrée. Un bon moyen de réduire les quantités de sucre dans les pâtisseries ?

J'adis les idées nutritionnelles de la théorie des humeurs se limitaient à combattre des excès de tempéraments par des aliments opposés. C'est pourquoi, encore aujourd'hui, on mange du melon, froid et humide, avec du jambon cru, sec et chaud. Les progrès de la chimie, après le XVIIIe siècle, ont permis d'analyser le contenu des aliments en composés dont on a progressivement mieux compris l'action sensorielle, nutritionnelle ou toxique. Aujourd'hui, la biodisponibilité des composés des aliments (leur aptitude à passer dans l'organisme avant élimination) est l'objet d'études. C'est en vertu de cette biodisponibilité que le carotène bêta (ou provitamine A) des carottes est plus ou moins actif, selon que l'on mange les carottes râpées en salade ou bien en purée.

Toutefois, les qualités des aliments ne sont pas plus réductibles à la composition chimique qu'à la biodisponibilité, car les diverses modalités sensorielles interagissent. Il en est ainsi de l'odeur et de la saveur: récemment, Élisabeth Guichard et ses collègues du Centre des sciences du goût, à Dijon, ont exploré comment certaines odeurs font croire à la perception de saveurs (*J. Agric. Food Chem.*, 6 novembre 2019).

Les chercheurs dijonnais sont partis de l'analyse d'un jus d'orange. Les composés odorants, séparés du jus par chromatographie, étaient proposés à des personnes à qui l'on demandait de décrire l'odeur, puis la saveur évoquée. Des analyses statistiques ont dégagé pour chaque stimulus une fréquence de détection de l'odeur et une fréquence de détection d'une saveur.

Au total, 13 impressions odorantes ont été associées à du sucré, 16 à de l'acide, 10 à du salé et 21 à de l'amer. Par exemple, les descripteurs «odeur fruitée», «odeur sucrée», «odeur de fraise», «odeur florale» sont corrélés à une saveur sucrée; les odeurs de pomme de terre, de champignon, sulfurée sont plutôt associées à une saveur salée. Les odeurs de fromage, d'agrumes sont associées à la saveur acide; les odeurs d'herbes aromatiques, de fumé, d'épicé sont associées à l'amertume.

Il serait long d'entrer dans les détails de l'étude, mais l'utilisation en cuisine des résultats est claire: on peut réduire le sucre ou le sel, notamment, en ajoutant des composés odorants corrélés à ces saveurs. Par exemple du (E)-β-damascénone pour du sucré, de la 1-octène-3-one ou du furfural pour du salé, du géraniol pour de l'acide...

Pour réduire davantage le sucre ou le sel sans perdre en saveur, le cuisinier devrait aussi construire des consistances hétérogènes, en plaçant par exemple les composés sapides dans la périphérie des fragments que la mastication formera. Ces composés seront alors plus facilement accessibles et agiront plus efficacement que s'ils étaient enfouis au cœur des fragments d'aliments. Cela rejoint ce qu'Ana Carolina Mosca et ses collègues de Wageningen, aux Pays-Bas, ont montré dès 2010: des gels où du sucre est réparti de façon homogène sont perçus moins sucrés que s'ils sont faits de couches de différentes concentrations, surtout si ces gels sont très tendres. Les cuisiniers le savaient, puisqu'ils disent depuis longtemps qu'il ne faut pas trop «coller» les gelées, sous peine de perdre du goût. ■

LA RECETTE

1 Chauffer 500 g de bouillon de volaille non salé pour y dissoudre 25 g de gélatine (en feuilles, préalablement trempées dans de l'eau froide) et seulement 2 g de sel.
2 Y mettre des lamelles très minces de champignons de Paris juste le temps qu'elles soient assouplies, puis les récupérer à l'écumoire et en couvrir un film alimentaire.
3 Mettre ce film dans un large plat, et couler un peu de gelée fortement poivrée. Laisser prendre.
4 Quand la gelée est prise, tapisser la surface avec une mince couche de jambon.
5 Badigeonner de sauce mayonnaise (jaune d'œuf, vinaigre, huile de tournesol, piment de Cayenne, mais pas de sel).
6 Couler à nouveau de la gelée.
7 Quand la gelée est prise, replier le film sur lui-même, décoller la partie supérieure et replier le reste encore en deux. Puis replier encore une fois en deux.
8 Mettre au froid.
9 À l'emporte-pièce carré, détailler des portions de ce millefeuille peu salé.

© Africa Studio / shutterstock.com

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET

15H / 17H LE SAMEDI



DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE

Crédit photo : © Christophe Abramowitz

france inter

INTERVENEZ

ABONNEZ-VOUS AU PODCAST DE L'ÉMISSION

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

ANODINS

Ainsi jadis appelait-on (du grec *an-odunè*, « qui supprime la douleur ») des substances antalgiques, utilisées par les médecins depuis l'Antiquité. La recette de ces remèdes ? Souvent des plantes réputées adoucissantes (mauve, aneth, orge, etc.), agrémentées de vin ou d'eau-de-vie pour la bonne cause, voire d'opium, peu coûteux à l'époque !

1 000 000 °C

C'est la température de la couronne solaire, région externe de l'atmosphère du Soleil. Cette température est bien supérieure à celle de la surface de l'étoile (environ 5 500 °C).

P. 6 « *En sciences sociales se développe une anthropologie de la nuit, qui montre que les liens sociaux de la vie nocturne sont différents des liens sociaux de la vie diurne* »

VIRGINIE TOURNAY
Biologiste et politologue à Sciences Po, à Paris

386 MILLIONS D'ANNÉES

C'est l'âge de la forêt fossile la plus ancienne connue à ce jour. Elle vient d'être découverte dans une ancienne carrière de l'État de New York, aux États-Unis.

CHÉTOGNATHES

Ces étranges petits animaux marins, mesurant de quelques millimètres à plus de dix centimètres, sont une curiosité zoologique ; en forme de torpille ou de flèche, ces redoutables prédateurs à la morsure empoisonnée sont aussi cannibales.

EFFUSIVITÉ

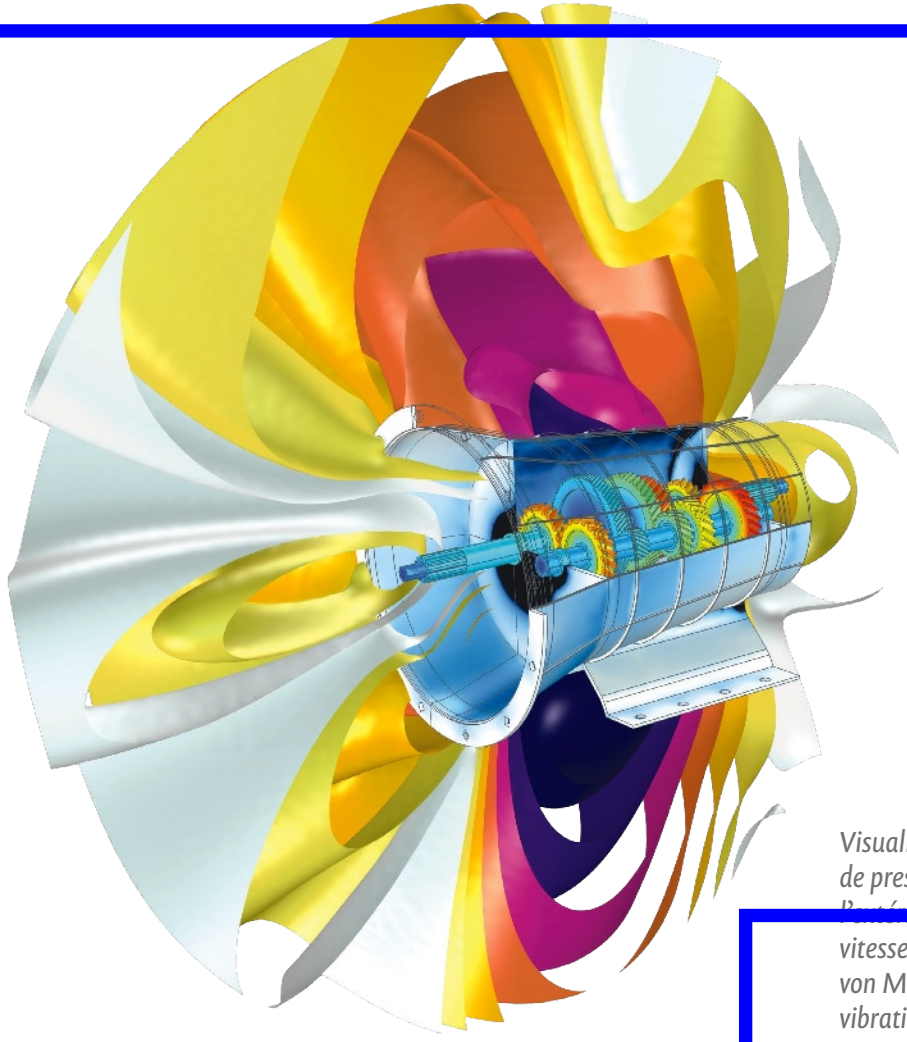
Cette grandeur, associée à un matériau, quantifie l'aptitude de ce matériau à absorber ou à restituer de l'énergie thermique. Elle s'exprime en fonction de la conductivité thermique et de la capacité calorifique.

1,3 MILLION

C'est, en kilomètres carrés, la superficie de la portion du plancher océanique [illegible] la Russie. Cette étendue chevauche plus de la moitié des 900 000 kilomètres carrés réclamés par le Danemark.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 3636 – Février 2020 – N° d'édition : M0770508-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 242151 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

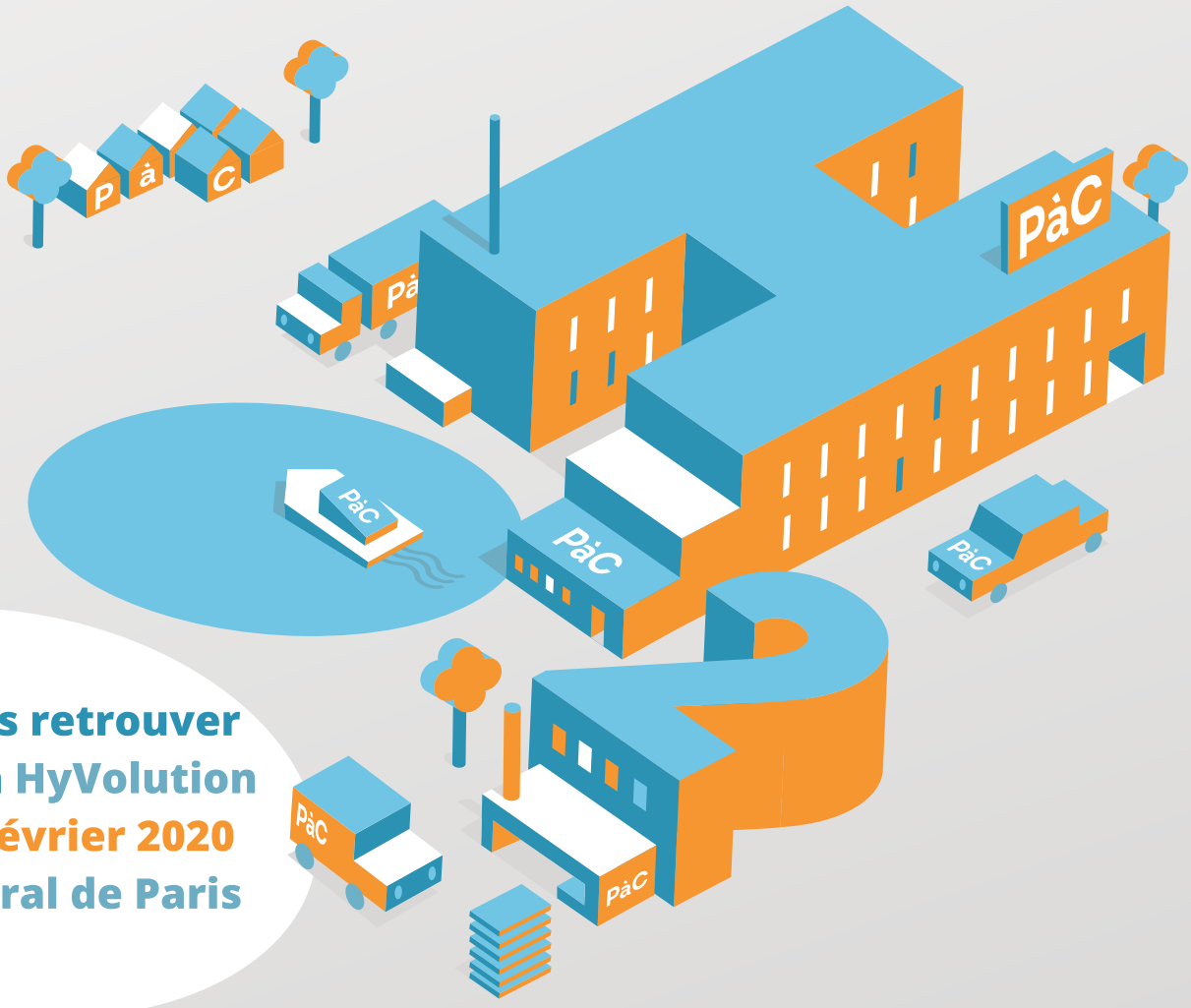
Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation

COMSOL

L'ADEME SERA PRÉSENTE SUR HYVOLUTION

Le rendez-vous incontournable des acteurs de l'hydrogène en France et en Europe



Venez nous retrouver sur le salon HyVolution les 4 et 5 février 2020 au parc floral de Paris

HYDROGÈNE & PILES à COMBUSTIBLE

Des solutions pour la Transition Énergétique et Écologique

ADEME

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

HyVolution

L'ÉVÉNEMENT HYDROGÈNE POUR L'ÉNERGIE, L'INDUSTRIE, LA MOBILITÉ

4 & 5 FÉVRIER 2020

PARC FLORAL PARIS, FRANCE