

GÉOSCIENCES

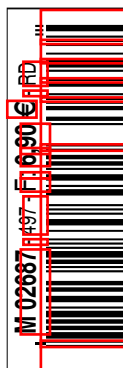
**STRATOSPHERE:
UN CYCLE DE VENTS
NÉ DU CHAOS**

ANTHROPOLOGIE

**LA GUERRE
EST-ELLE DANS LA
NATURE HUMAINE ?**

PHYSIQUE

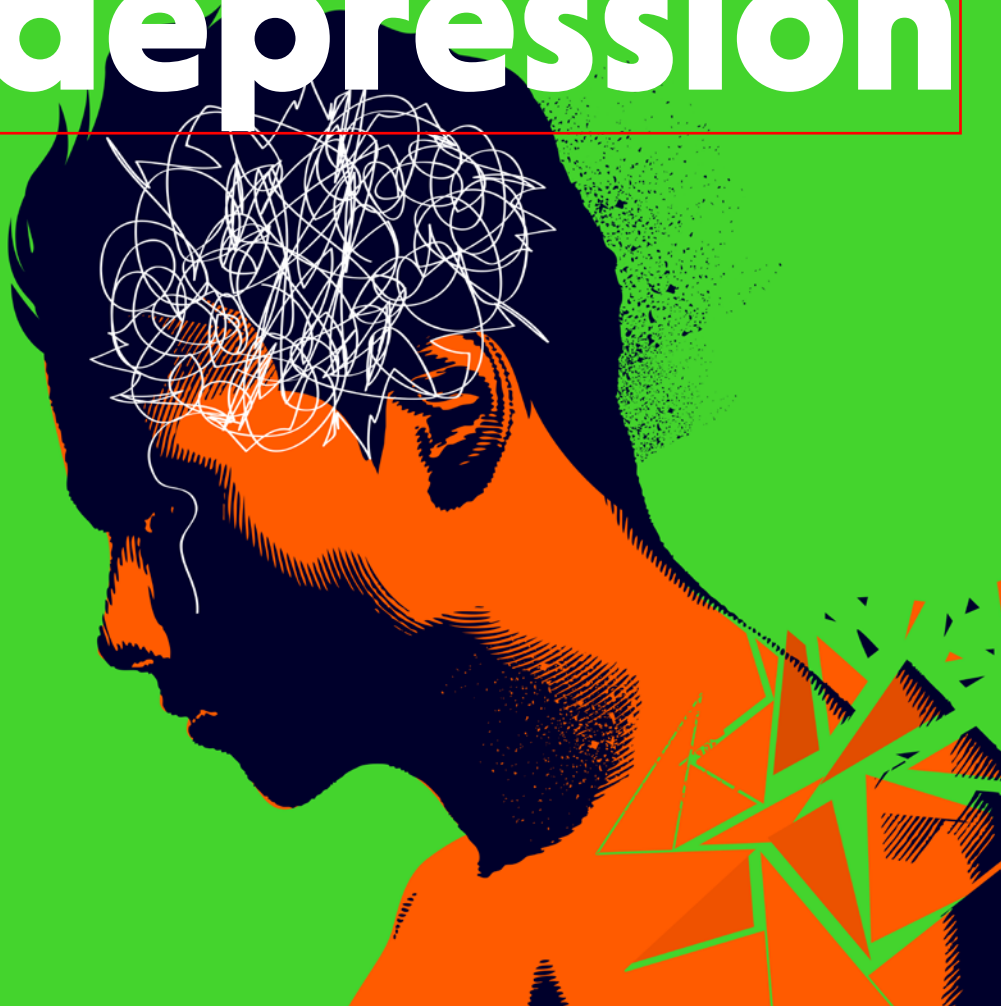
**LA PARADOXALE
STABILITÉ
DES NANOBULES**



MARS 2019
N° 497

CARENCES, HORMONES, INFLAMMATION

Les causes insoupçonnées de la dépression



Découvrez notre hors-série numérique

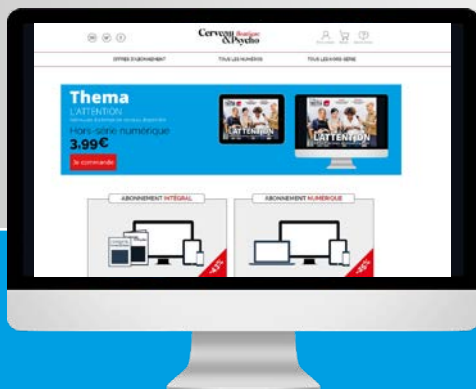
L'ATTENTION

**RETROUVEZ DU TEMPS
DE CERVEAU DISPONIBLE**

3,99 €



80 pages de lecture
pour tout savoir sur le sujet



Les *Thema* sont une nouvelle collection de hors-séries numériques. Chaque *Thema* contient une sélection des meilleurs articles sur un sujet.

- 1 Commandez le *Thema* sur boutique.cerveauetpsycho.fr
- 2 Rendez-vous sur votre compte client, dans la rubrique **Ma bibliothèque numérique**
- 3 **Téléchargez le PDF** directement depuis votre tablette, téléphone ou ordinateur
- 4 Bonne lecture !

Rendez-vous sur

boutique.cerveauetpsycho.fr



**E
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

MENS SANA IN CORPORE SANO

Selon les estimations de l'Organisation mondiale de la santé, plus de 300 millions de personnes souffrent de dépression, pathologie qui représente la première cause d'incapacité dans le monde. Et il n'y a pas que la dépression: on estime qu'une personne sur quatre sera affectée au cours de sa vie par des troubles

mentaux. Au-delà du mal-être et de l'impact négatif sur la vie sociale et la productivité, ces affections sont responsables d'une bonne partie des quelque 800 000 morts annuelles par suicide.

C'est dire l'importance d'une lutte efficace contre les maladies dites psychiatriques. Une lutte qui doit porter sur de multiples fronts: prise en charge des personnes, disponibilité d'infrastructures et de personnels, diagnostics fiables, traitements adaptés, recherche scientifique...

Bien que les efforts consacrés à tel ou tel aspect du problème soient généralement insuffisants, on connaît des progrès. L'un d'eux est la prise de conscience, hélas pas encore généralisée, que les troubles psychiatriques ont parfois une origine organique: par exemple, certains cas de dépression sévère sont dus à une inflammation ou à une simple carence en vitamine B12! De ce fait, près de 10% des diagnostics psychiatriques seraient erronés et expliqueraient l'errance de patients sur lesquels les traitements prescrits sont inopérants. C'est notamment ce qui ressort du tableau brossé par Alexis Bourla, Florian Ferreri et Stéphane Mouchabac (voir pages 42 à 48).

On commence aussi à comprendre les mécanismes par lesquels des affections du corps ont un impact sur notre cerveau, donc sur notre état mental. Lucile Capuron et Nathalie Castanon nous décrivent ainsi ce que l'on sait de la chaîne causale qui va d'une inflammation à la dépression (voir pages 34 à 40). En fait, le lien corps-cerveau fait l'objet depuis quelques années d'un profond réexamen par la biomédecine. Ce qui remet en cause la séparation de la psychiatrie d'avec la neurologie et les autres disciplines médicales, qui s'est opérée en France après 1968. ■

Nous avons appris avec tristesse le décès de Max Brossollet, président des éditions Belin de 1969 à 1996 et fondateur avec Philippe Boulanger de la revue *Pour la Science* en 1977.

Toute l'équipe de *Pour la Science* adresse ses sincères condoléances à sa famille.

S

SOMMAIRE

N° 497 /
Mars 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Alzheimer: la piste du débit sanguin
- Des olympiades pour donner le goût des sciences
- La grotte de Denisova enfin bien datée
- Une aile battante optimale
- Une origine génétique de la migraine
- De la Lune à la Terre, une histoire d'impacts
- Mesurer la constante de Hubble avec les quasars

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

En mars, méfiez-vous de la parité
Gilles Dowek

P. 24

QUESTIONS DE CONFIANCE

La science et le chat du Cheshire
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 26

GEOSCIENCES

VENTS STRATOSPHERIQUES, UN CYCLE NÉ DU CHAOS

L.-A. Couston, B. Favier
et M. Le Bars

Dans la stratosphère, les vents équatoriaux s'inversent tous les quatorze mois environ. Ce cycle serait dû au caractère intermittent des tempêtes tropicales. Des expériences et des simulations le confirment.



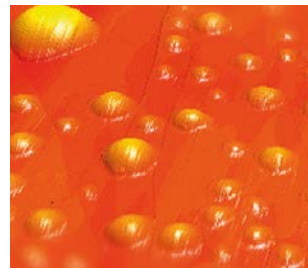
P. 50

PALEONTOLOGIE

FAIRE PARLER LES VIEUX DÉBRIS

Thomas Higham
et Katerina Douka

Une récente technique permet d'identifier le groupe animal auquel correspond un fragment d'os fossile. Son application aux débris préhistoriques de la grotte de Denisova, en Sibérie, a contribué aux découvertes spectaculaires sur les humains qui s'y sont côtoyés.



P. 58

PHYSIQUE

LE PARADOXE DES NANOBULLES

Detlef Lohse

Depuis près de vingt ans, on sait que des bulles de taille nanométrique accrochées à une surface ont une durée de vie de plusieurs jours. Or les physiciens calculaient qu'elles devraient se dissoudre en quelques microsecondes...: une énigme qu'ils n'ont résolue que récemment.



P. 66

ANTHROPOLOGIE

SOMMES-NOUS DES GUERRIERS-NÉS?

R. Brian Ferguson

Pourquoi les hommes font-ils la guerre? L'ont-ils toujours faite? Le croisement des données archéologiques, anthropologiques et ethnologiques apporte un nouvel éclairage sur ces questions très controversées.



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

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



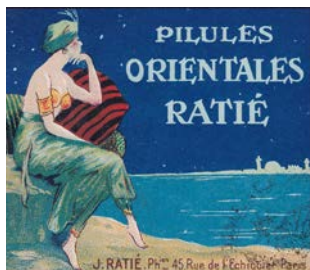
Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture:
© Solarseven/Shutterstock.com

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
des éditions HumenSciences
sur une sélection d'abonnés France
métropolitaine.



P.72

HISTOIRE DES SCIENCES

PILULES ORIENTALES POUR POITRINE IDÉALE

Cécile Raynal
et Thierry Lefebvre

À la fin du XIX^e siècle, un nouveau remède promettait à ses utilisatrices «splendeur du buste et luxuriance des seins». La mode, une bonne publicité et une très souple législation du médicament lui ont assuré un immense succès.

Au centre du numéro

CAHIER SPÉCIAL

DÉVELOPPEMENT ET NOUVEAU MIX ÉNERGÉTIQUE

En partenariat avec



À LA UNE

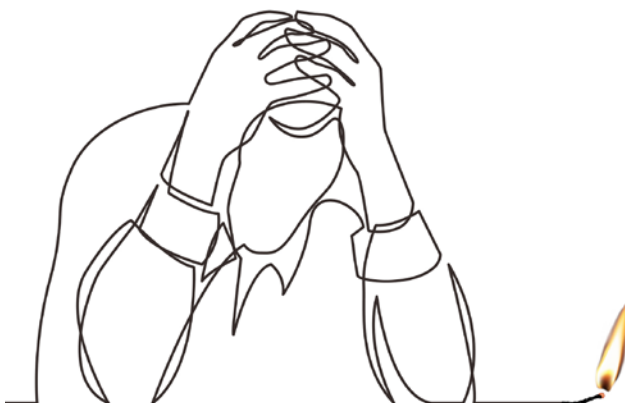
P.34

NEUROSCIENCES

L'ORIGINE INFLAMMATOIRE DE LA DÉPRESSION

Lucile Capuron et Nathalie Castanon

Lorsqu'une inflammation s'installe dans l'organisme, elle perturbe le fonctionnement du cerveau au point parfois de déclencher une dépression. On commence à comprendre par quels mécanismes.



P.42

NEUROSCIENCES

CES MALADIES PSYCHIATRIQUES QUI N'EN SONT PAS

Alexis Bourla, Florian Ferreri et Stéphane Mouchabac

Dépression sévère? Schizophrénie? Non: carence en vitamines. Tel est l'étonnant diagnostic que reçoivent certains patients, victimes de pathologies dites organopsychiatriques. Véritables caméléons, ces pathologies miment toutes sortes de maladies mentales et provoquent souvent une longue errance médicale.

RENDEZ-VOUS

P.78

LOGIQUE & CALCUL

LES MATHS AU PÉRIL DE LA CONTRADICTION

Jean-Paul Delahaye

Risque-t-on de trouver au cœur des mathématiques une contradiction qui obligerait à tout revoir? Telle était la crainte de l'éminent mathématicien américain Edward Nelson.

P.84

IDÉES DE PHYSIQUE

Vols d'araignées au-dessus des océans

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik



P.88

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Quand les protéines travaillent au noir

Hervé Le Guyader

P.92

SCIENCE & GASTRONOMIE

Faire une liaison à l'œuf dur

Hervé This

P.94

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

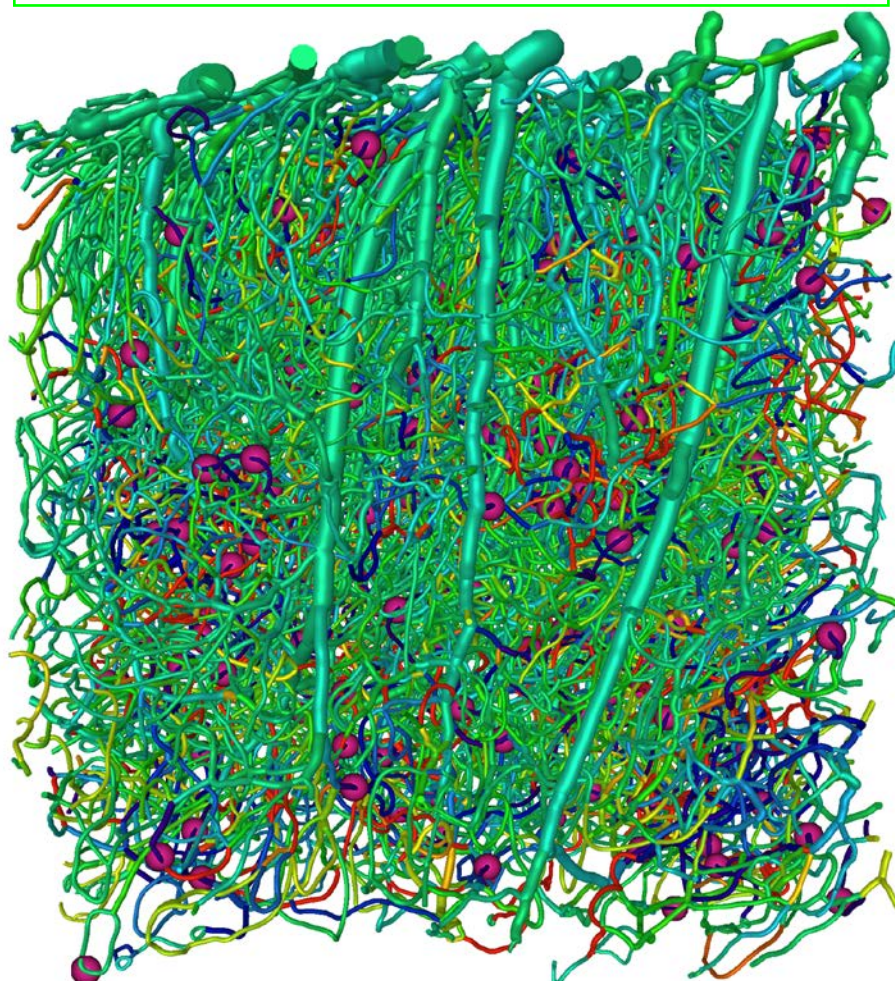
P.18 Livres du mois

P.20 Agenda

P.22 Homo sapiens informaticus

P.24 Questions de confiance

ALZHEIMER: LA PISTE DU DÉBIT SANGUIN



Une occlusion de 2% des capillaires cérébraux chez la souris (sphères violettes) suffit à ralentir considérablement le débit sanguin, comme l'illustre cette simulation (plus les vaisseaux sont bleus, plus le débit est ralenti).

Chez des modèles murins de la maladie, des cellules diminuent le débit sanguin cérébral. Quand on les élimine, les souris retrouvent des capacités cognitives normales.

Sur les quelque 50 millions de cas de démence répertoriés dans le monde, 60 à 70% seraient dus à la maladie d'Alzheimer, selon l'Organisation mondiale de la santé. L'agrégation de protéines β -amyloïdes entre les neurones et leur accumulation dans les tissus cérébraux est la principale caractéristique de cette pathologie qui, peu à peu, détruit les connexions entre neurones et conduit à leur mort.

Toutefois, de plus en plus d'études suggèrent que la maladie d'Alzheimer n'est pas seulement une pathologie du système

nerveux central et que les causes de son développement seraient à chercher plus loin. Une étude internationale dirigée par Nozomi Nishimura et Chris Schaffer, de l'université Cornell, aux États-Unis, vient ainsi de mettre en évidence un nouveau mécanisme qui, en diminuant le débit sanguin dans le cerveau, contribuerait au développement de la maladie.

On sait depuis longtemps que sans une bonne vascularisation et un débit sanguin suffisant, le cerveau ne peut fonctionner correctement: sans une bonne irrigation, les neurones ne reçoivent plus assez d'oxygène et de glucose pour maintenir leur

production interne d'énergie à un niveau suffisant. Plusieurs formes de démence sont ainsi associées à un problème de vascularisation cérébrale, dont la maladie d'Alzheimer.

En effet, diverses études ont montré que, très tôt dans l'évolution de cette pathologie, le débit sanguin diminue dans le cerveau des personnes atteintes, de même que chez des modèles murins de la maladie (des souris exprimant des gènes mutés qui favorisent la production d'agrégats amyloïdes). Par ailleurs, la diminution du débit sanguin accélérerait le développement de la maladie: plusieurs études chez des souris modèles ont montré que lorsque l'on perturbait le flux sanguin dans le cerveau, les agrégats amyloïdes s'accumulaient davantage. Le débit sanguin dans le cerveau influencerait donc non seulement sur

les pertes de fonction cognitive, mais aussi sur la progression de la maladie.

Toutefois, les mécanismes reliant le débit sanguin et la maladie d'Alzheimer restaient obscurs. « Nous avons donc recherché la cause de la baisse de débit sanguin chez des souris ayant un modèle de la maladie en scrutant leur vascularisation cérébrale à l'aide d'une technique de microscopie à fluorescence, la microscopie par excitation à deux photons, qui permet de distinguer *in vivo* le flux sanguin jusque dans les petits capillaires, et ce sur toute l'épaisseur du cortex », explique Sylvie Lorthois, directrice de recherche du CNRS à l'institut de mécanique des fluides de Toulouse et coauteure de l'étude.

Résultat : si le sang s'écoulait toujours dans les artérioles et les vénules des souris modèles, ce n'était pas le cas dans tous les capillaires. Ceux où le flux sanguin s'interrompait étaient plus nombreux que chez les souris saines. À l'aide d'anticorps fluorescents spécifiques des différentes cellules circulant dans le sang, les chercheurs ont ensuite montré la présence, dans la plupart des capillaires bouchés, d'un type de globules blancs nommés neutrophiles.

Les neutrophiles étaient-ils la cause des obstructions ? Oui, a révélé... une erreur de manipulation. En injectant une plus grande quantité d'anticorps spécifique des neutrophiles, les chercheurs se sont aperçus que non seulement les capillaires se débouchaient, mais qu'en quelques heures, les neutrophiles avaient quasiment disparu de ces vaisseaux, tandis que le débit sanguin dans le cortex augmentait. Par ailleurs, les souris traitées retrouvaient en un mois des capacités normales de mémorisation à court terme.

Empêcher les neutrophiles d'adhérer à la paroi des capillaires constituerait donc une piste thérapeutique pour entraver la progression de la maladie d'Alzheimer et de ses symptômes. « En effet, précise Sylvie Lorthois, nous avons complété les expériences, impossibles à réaliser chez l'homme, en montrant par simulation numérique que le réseau vasculaire cérébral humain n'est pas plus robuste que celui de la souris à de telles occlusions. » Des tests sont prévus avec plusieurs molécules déjà connues pour empêcher l'adhérence des neutrophiles et utilisées dans le traitement de maladies auto-immunes et de la sclérose en plaques. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

J. C. Cruz Hernández et al., *Nature Neuroscience*, en ligne le 11 février 2019

Des olympiades pour donner le goût des sciences

Laver avec de l'eau dégazée, étudier les propriétés des fils d'araignée, simuler un détecteur d'ondes gravitationnelles, etc. : tels sont quelques-uns des sujets présentés lors des « Olympiades de physique France », qui se sont tenues à Lille le mois dernier. Pierre Chavel nous décrit ce concours destiné aux lycéens et ses objectifs.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

PIERRE CHAVEL
président du comité
d'organisation des
Olympiades de physique
France

Comment se déroule ce concours, dont la 26^e édition vient de se tenir à Lille ?

Le concours est ouvert à tous les lycées de France ainsi qu'aux lycées francophones de l'étranger. Cette année, nous avons eu le plaisir d'accueillir en finale une équipe du Vietnam et une autre d'Australie. Dès le mois de mai, des lycéens, par groupes de deux à six, déclarent leur intérêt pour préparer un projet en vue du concours. Un professeur de leur établissement se porte volontaire pour les accompagner. Ensemble, ils définissent alors un projet qui doit mettre l'accent sur l'approche expérimentale, avec un aspect original dans la conception ou l'exploitation de l'expérience. Ils déterminent aussi les aides qu'ils pourraient solliciter auprès de laboratoires publics ou privés.

Entre 60 et 100 équipes présentent d'abord leur projet au concours interacadémique. Puis environ 25 équipes poursuivent l'aventure au concours national, la « finale ». Certaines se présenteront peut-être à des concours internationaux.

À quoi ressemble un projet monté par des lycéens ?

Un point important est l'accent porté sur l'initiative. L'équipe est amenée à se poser des questions pour comprendre un phénomène physique. Pour y répondre, avec l'aide de leur professeur, les élèves conçoivent des expériences, se procurent le matériel, montent et testent les expériences, puis, en fonction du sujet, peuvent être amenés à conduire des campagnes de mesure.

Les sujets sont très divers.
Par exemple, certains se sont interrogés sur les processus à l'œuvre dans la construction de châteaux de sable, d'autres ont conçu un rideau de bulles pour filtrer des déchets dans un canal (idée qui pourrait être mise en place

prochainement en conditions réelles), d'autres ont construit un piano virtuel avec un laser, ou mesuré la vitesse de la lumière avec un miroir tournant, etc.

Les élèves ont manifestement du plaisir à s'investir dans leur projet. Est-ce là l'un des objectifs du concours ?

L'une des ambitions des olympiades est de donner le goût de la science et de la démarche scientifique à ces jeunes. Je pense que c'est un pari gagné : certains participants ne comptent pas leur temps et ont passé leurs mercredis après-midi, leurs week-ends, parfois leurs vacances pour mener à bien leur projet. Et au vu des résultats, ils peuvent être très fiers d'eux.

Ce concours est aussi une belle façon de découvrir le travail d'équipe, l'esprit d'initiative et le fait d'être actif dans la science. En plus d'être confrontés à des notions de physique qui dépassent le programme du lycée, les candidats sont amenés à concevoir des circuits électroniques, à faire de la programmation... Autant de compétences qui leur serviront dans la poursuite de leurs études et de leur carrière, scientifique ou non.

Certains sont peut-être de futurs chercheurs ?

Susciter de telles vocations au travers des olympiades est évidemment un de nos souhaits. Dans un contexte où les filières scientifiques dans les études supérieures sont un peu délaissées, il est important de montrer que la science et sa pratique sont passionnantes.

Par ailleurs, nous sommes très fiers d'avoir eu cette année, lors de la finale, près de 55 % de lycéennes. Espérons qu'elles suivront des études supérieures : ce concours est une façon de combattre les stéréotypes qui écartent les femmes de certaines disciplines scientifiques.

Que souhaitez-vous pour les futures olympiades ?

Les olympiades constituent une expérience exceptionnelle pour les élèves. Nous espérons que toujours plus de lycéens et d'établissements auront envie de participer à cette aventure. ■

PALÉONTOLOGIE

LA GROTTE DE DENISOVA ENFIN BIEN DATÉE

Les strates de ce site capital pour les paléanthropologues viennent enfin d'être placées sur une chronologie précise couvrant plus de 300 000 ans.

L'un des sites préhistoriques les plus fascinants est la grotte de Denisova, en Sibérie. Elle a en effet livré en 2010 les Denisoviens, une espèce humaine jusque-là inconnue, et en 2018 la première métisse née d'une Néandertalienne et d'un Denisovien. Les traces de la présence de Denisoviens et de Néandertaliens s'étalent entre il y a 300 000 ans et 40 000 ans environ, mais elles sont difficiles à dater. Deux équipes, celle de Katerina Douka, de l'institut Max-Planck à Iéna, et celle de Zenobia Jacobs, de l'université Wallongong, en Australie, se sont attaquées au problème avec de nouvelles techniques et viennent de fournir la première chronologie cohérente pour le site (voir aussi l'article de Thomas Higham et Katerina Douka, pages 50 à 57).

L'équipe de Zenobia Jacobs a reconstitué l'environnement denisovien de 300 000 à 20 000 ans. Les chercheurs ont utilisé la luminescence stimulée optiquement, une technique optique de datation, afin de situer dans le temps les restes de 27 espèces de grands vertébrés, de 100 espèces de petits vertébrés et de 72 espèces de plantes. Les variations entre forêts de feuillus (périodes chaudes) et toundra (périodes froides) ainsi reconstruites coïncident pour l'essentiel avec celles de l'environnement du lac Baïkal, à quelque 1600 kilomètres à l'est. Dans le système chronologique des stades isotopiques de l'oxygène (SIO), très utilisé aujourd'hui, les données obtenues signifient que les climats qui ont produit les strates de Denisova sont bien datés entre le SIO9 (337 000 à 374 000 ans) et le SIO2 (29 000 à 14 000 ans).

L'équipe de Katerina Douka a, elle, daté les 14 restes fossiles d'humains de Denisova. La plupart n'étant pas datables par le carbone 14, les chercheurs ont construit (à l'aide d'un modèle bayésien) un arbre probable de parenté, aux branches datées, reliant les génomes humains séquencés de Denisova entre eux et aux génomes connus d'*Homo sapiens* et d'*H. neanderthalensis*.

Il en ressort que le plus ancien fossile du site, celui d'un Denisovien, date d'il y a 122 700 à 194 400 ans. Deux fossiles néandertaliens datent d'entre 90 900 et 130 300 ans, mais les plus anciens sédiments contenant des traces d'ADN néandertalien remontent à il y a quelque



Thomas Higham, de l'université d'Oxford, et Natalia Belousova, de l'Académie russe des sciences, en train de prélever des échantillons. À droite, l'un des pendentifs en os trouvés dans la grotte.

4

**PENDANTS
FABRIQUÉS À PARTIR
DE DENTS DE CERF
ÉLAPHE ET D'ÉLAN
DÉCOUVERTS
DANS LA GROTTE
ÉVOQUENT
DES ORNEMENTS
TYPIQUES
DES CULTURES
NÉANDERTALIENNES
ET SAPIENS DU DÉBUT
DU PALÉOLITHIQUE
SUPÉRIEUR.
MAIS ILS SERAIENT
DENISOVIENS...**

190 000 ans... Quant à la métisse évoquée plus haut, dénommée Denisova 11, elle a vécu il y a entre 79 300 et 118 100 ans. Et le plus récent fossile denisovien (Denisova 3), trouvé dans une position stratigraphique comparable à celles de deux fossiles néandertaliens, a vécu il y a 76 600 à 51 600 ans. Il est ainsi de plus en plus clair que pendant des centaines de milliers d'années, Néandertaliens et Denisoviens ont fréquenté la grotte et s'y sont côtoyés.

Un autre point frappant est l'absence à Denisova de tout fossile ou trace d'ADN *sapiens*, alors que l'on y a découvert deux assemblages lithiques accompagnés d'ornements d'un type que, autrefois, on attribuait toujours à *H. sapiens*. Datés d'entre 32 000 et 48 000 ans, ils remontent donc à la période d'arrivée de notre espèce en Sibérie. Aucune trace fossile ou génétique d'*H. sapiens* n'étant décelable sur le site, l'explication la plus simple, selon les chercheurs, est que les derniers Denisoviens sont les auteurs de ces ornements. Dans ce cas, eux aussi auraient développé des cultures modernes comparables à celles que l'on connaît à la même époque chez *H. neanderthalensis* et *H. sapiens*. ■

FRANÇOIS SAVATIER

K. Douka et al., *Nature*, vol. 565, pp. 640-644, 2019 ;
Z. Jacobs et al., *ibid.*, pp. 594-599, 2019

DES GORILLES
HYPERSOCIAUX

Giovanni Forcina, de l'université de Barcelone, et des collègues ont évalué le taux de rencontres entre trois groupes de gorilles des plaines (*Gorilla gorilla ssp. gorilla*) en les observant au jour le jour pendant cinq années, et ont par ailleurs étudié les génotypes d'une population plus grande. Ces deux approches ont montré que le système social de ces gorilles est bien plus dynamique qu'on ne le soupçonnait : les rencontres paisibles, les jeux communs et les échanges d'individus entre groupes sont fréquents. Un comportement qui a dû jouer un grand rôle dans l'évolution de l'espèce.

UN TRAITEMENT
ANTICHLAMYDIA

Le laboratoire d'Emmanuel Ho, de la faculté de pharmacie de l'université de Waterloo, en Ontario, a créé un nouveau traitement contre les infections à *Chlamydia*. Ce traitement cible la majorité des bactéries en les empêchant de pénétrer dans les cellules du tractus génital et en détruisant toute bactérie capable de pénétrer une paroi cellulaire. Les chercheurs ont réussi à atteindre cet objectif à l'aide d'un petit ARN interférent qui cible un gène spécifique dans l'appareil reproducteur féminin, le gène *PDGFR-β*, qui code une protéine se liant aux bactéries *Chlamydia*.

LES TROIS TUMULUS
D'ERQUY

Sur le site des Prés Biard, à Erquy, dans les Côtes d'Armor, l'Inrap a mis en évidence de multiples occupations successives. Celle de l'âge du Bronze se distingue par trois tumulus ronds de six mètres de diamètre délimités par des dalles de grès. Deux de ces sépultures de prestige datant de quelque 3 000 ans renfermaient des dépôts de céramique ; la troisième contenait un coffrage de bois toujours visible.

ENCOMBRANTES
SAUMURES

Le dessalement de l'eau de mer ou d'eaux saumâtres est une solution de plus en plus adoptée par les pays qui manquent d'eau. Mais la médaille a son revers : comme l'indique une synthèse publiée par Manzoor Qadir, de l'université des Nations unies, au Canada, et ses collègues, le volume de saumures rejetées par cette activité est énorme et représente un vrai problème environnemental.

Manzoor Qadir et ses collègues ont estimé à 95 millions de mètres cubes par jour la quantité d'eau dessalée produite dans le monde, tandis que le volume des saumures rejetées serait de 142 millions de mètres cubes par jour, chiffre supérieur de 50% aux estimations précédentes. De quoi recouvrir en une année une superficie équivalente à celle de la France métropolitaine sur une hauteur de près de 10 centimètres... Ces chiffres cachent de grandes disparités régionales, en fonction du nombre et de la capacité des installations présentes, de la technique utilisée, de la salinité des eaux traitées, etc. Ainsi, 70% des saumures sont produites par l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, et 55% par seulement quatre États du golfe Persique : l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis, le Koweït et le Qatar.

Dans la plupart des cas, les saumures sont rejetées en mer, 80% des unités de dessalement



Une usine de dessalement de l'eau de mer à Dubaï, aux Émirats arabes unis.

se trouvant à moins de 10 kilomètres de la côte. Plus denses que l'eau de mer, elles appauvrissent en oxygène les eaux profondes et accroissent leur salinité, ce qui nuit à la vie des fonds marins. Quant aux unités de l'intérieur des terres, elles stockent leurs saumures dans des réservoirs à ciel ouvert, des bassins d'évaporation ou des puits profonds... De fait, il existe encore peu de méthodes de gestion des saumures qui soient viables à la fois économiquement et écologiquement. Et le manque d'eau douce ne cessant de s'aggraver, on peut parier que le problème des saumures n'est pas près d'être résolu. ■

MAURICE MASHAAL

E. Jones et al., *Science of the Total Environment*, vol. 657, pp. 1343-1356, 2019

AUX SOURCES
D'EBOLA

Depuis sa découverte en 1976, le virus Ebola a causé de nombreuses victimes sur le continent africain, à travers pas moins de 28 épisodes de contagion. Deux équipes, dirigées par Martine Peeters et Ahidjo Ayoub, de l'IRD, se sont intéressées aux rôles des chauves-souris et des singes dans la transmission du virus à l'humain, afin de mieux comprendre l'origine de ces épidémies.

Les chercheurs ont prélevé des échantillons de sang sur 4022 chauves-souris. Du côté des primates, ils ont réalisé des prélèvements sanguins et de selles auprès de 4649 individus. Ils ont ensuite testé ces extraits avec des antigènes du virus Ebola. La réactivité d'un échantillon témoigne de la présence d'anticorps et, par extension, du contact de l'animal avec le virus. Résultats : huit espèces de chauves-souris



Les roussettes paillées africaines (*Eidolon helvum*) constitueraient un réservoir pour le virus Ebola.

présentaient de tels anticorps, tandis que chez les primates, seul un individu a montré une réactivité similaire. Que signifient ces résultats ? Que les chauves-souris jouent bien un rôle de réservoir dans l'écologie du virus, tandis que les singes n'en sont que des hôtes intermédiaires. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

A. Ayoub et al., *J. Infect. Dis.*, en ligne le 18/1/2019 ; H. M. De Nys et al., *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 24, pp. 2228-2240, 2018

EN IMAGE

UNE AILE BATTANTE OPTIMALE

L'oiseau a été une grande source d'inspiration pour concevoir des dispositifs volants. Mais alors que la recherche s'est concentrée sur le cas des ailes fixes pour les avions, les ailes battantes sont bien moins comprises. Sophie Ramananarivo, au laboratoire LadHyX de l'École polytechnique, a recherché avec deux collègues de l'université de New York la forme optimale d'une aile de ce type.

Les chercheurs ont utilisé un algorithme d'optimisation évolutive. À l'image de l'évolution biologique, cet algorithme fait évoluer une population d'ailes par «croisement des meilleurs individus». Le profil d'une aile est décrit par une fonction mathématique, dont les paramètres constituent en quelque sorte les «gènes» de l'aile. Un jeu de paramètres donné (ou «génome») identifie de façon unique une aile, dont la performance est évaluée à partir de la vitesse de propulsion.

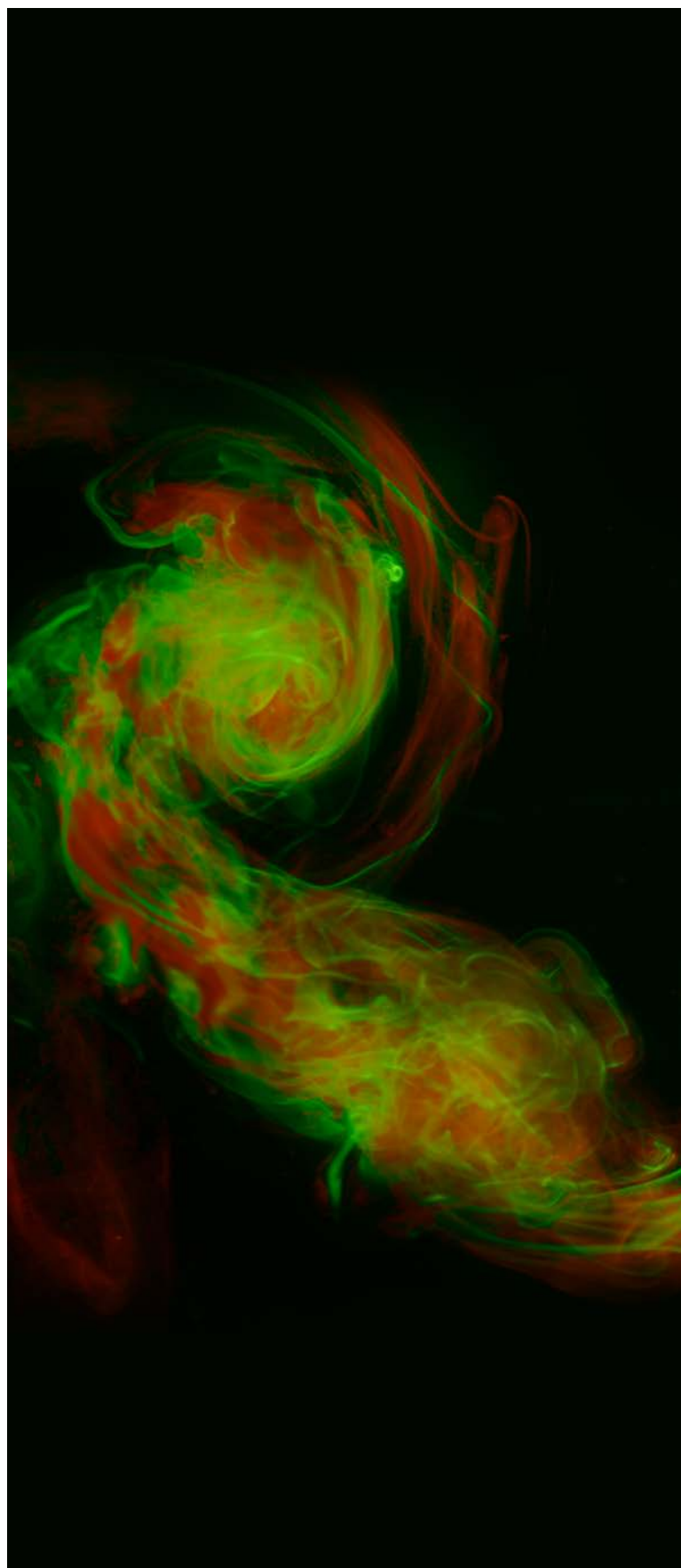
En partant d'une population initiale d'ailes aux profils variés, l'algorithme a produit de nouvelles générations d'ailes, en croisant les «gènes» des ailes les plus performantes. En outre, des «mutations» sont introduites dans le processus pour modifier de façon aléatoire les paramètres, ce qui introduit de nouveaux traits. En itérant le processus sur plusieurs générations, des ailes de plus en plus rapides apparaissent.

La meilleure aile trouvée a une forme de goutte d'eau allongée, dont le bord antérieur est rond et le bord postérieur beaucoup plus piqué. Ce profil diffère de celui d'une aile d'avion, autour duquel le type d'écoulement de l'air n'est pas le même. Dans le cas d'une aile fixe, l'écoulement longe le profil de l'aile, alors que pour l'aile battante, l'air se détache aux bords avant et arrière et s'enroule en tourbillons (ou vortex). L'intensité des tourbillons à l'arrière de l'aile détermine sa capacité à bien se propulser. Mais les vortex émis à l'avant ne doivent pas interférer destructivement avec ceux créés à l'arrière. Le meilleur compromis est un arrière pointu qui donne des vortex intenses et une forme ronde à l'avant qui engendre des vortex modérés.

Pour confirmer leurs résultats, les chercheurs ont testé des profils d'ailes battantes dans de l'eau (à droite de l'image). Des colorants injectés depuis l'intérieur de l'aile à l'avant (en rouge) et à l'arrière (en vert) permettent de visualiser les vortex. ■

S. B.

S. Ramananarivo et al., *Proc. R. Soc. A*, vol. 475, article 20180375, 2019





NEUROSCIENCES

UNE ORIGINE GÉNÉTIQUE DE LA MIGRAINE

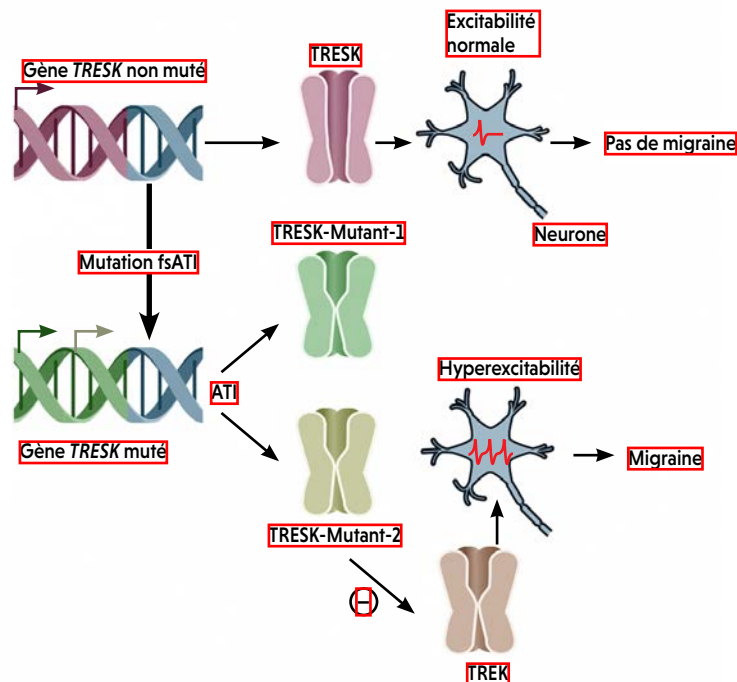
Une mutation particulière d'un gène provoquerait une hyperexcitabilité de certains neurones situés dans le crâne, dont résulterait la migraine.

Plus de 10 millions de Français souffrent régulièrement de migraines. Près de 20% des crises sont associées à des troubles neurologiques, notamment visuels et nommés auras, des sortes d'hallucinations. La douleur est si invalidante qu'en France, chaque année, 20 millions de jours de travail sont perdus. Et pourtant, aucun traitement vraiment efficace n'est encore disponible, notamment parce qu'on ne connaît pas l'origine du trouble. En revanche, les chercheurs savent depuis longtemps que la maladie est en grande partie héréditaire, le risque d'en souffrir augmentant de 80% si l'un des proches parents est atteint. De ce fait, identifier les mécanismes génétiques impliqués permettrait de mieux comprendre l'origine de la migraine. Or l'équipe de Guillaume Sandoz, de l'institut de biologie Valrose, à Nice, vient enfin de trouver un mécanisme génétique en cause.

On sait depuis une trentaine d'années que les douleurs associées à la migraine mettent en jeu le trijumeau (le plus grand des nerfs crâniens), et notamment ses fibres sensorielles qui transmettent de multiples informations dans le visage et le crâne, en particulier la douleur. Une hyperexcitabilité des neurones sensoriels de ce système est associée aux crises migraineuses, sans que l'on sache pourquoi cette suractivité existe chez certaines personnes et pas d'autres.

Les chercheurs français se sont donc intéressés à la propagation de l'influx nerveux le long des neurones, qui dépend de différents flux d'ions à travers la membrane de ces derniers, via des canaux ioniques. Notamment, les canaux potassiques K2P sont inhibiteurs (ils diminuent l'activité des neurones) et il en existe plusieurs types. On avait identifié des mutations du gène codant l'un de ces canaux, nommé TRESK, certaines provoquant des migraines, d'autres non. L'équipe de Guillaume Sandoz vient de découvrir qu'une mutation précise du gène *TRESK* provoque l'apparition de deux canaux potassiques mutants différents qui interviendraient dans la douleur. Mais quel est le mécanisme en jeu?

Normalement, le gène *TRESK* produit un intermédiaire – un ARN messager –, lequel est traduit en canal protéique TRESK qui, inséré dans la membrane des neurones, influe sur la propagation de l'influx nerveux en diminuant



Une mutation du gène *TRESK* conduit à la formation de canaux ioniques anormaux. L'un d'eux, TRESK-Mutant-2, inhibe l'action d'un autre canal, TREK. Le résultat est une hyperexcitabilité accrue pour les neurones du système trigéminal, à l'origine de la migraine.

l'excitabilité. Mais en cas de mutation, via un mécanisme que les chercheurs ont identifié et qu'ils ont nommé fsATI (*frameshift mutation induced-alternative translation initiation*), le gène *TRESK* muté produit deux ARN messagers distincts, qui conduisent à la fabrication de deux canaux : TRESK-Mutant-1 et TRESK-Mutant-2. Or ce dernier interagit avec d'autres canaux K2P, nommés TREK, qui ne remplissent alors plus leur fonction apaisante, ce qui conduit à une hyperexcitabilité des neurones. D'où la transmission de la douleur le long des fibres du trijumeau.

Par ailleurs, les chercheurs ont confirmé chez les animaux que si l'on bloque (génétiquement) l'activité des canaux TREK, les rats souffrent de migraines (qui se caractérisent par une hypersensibilité de la face). Ils espèrent maintenant trouver des molécules qui relanceraient l'activité des TREK chez les migraineux ou empêcheraient l'interaction de ces canaux avec les TRESK-Mutant-2. Ces molécules constitueraient alors des médicaments potentiels. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

P. Royal et al., *Neuron*, vol. 101(2), pp. 232-245, 2019

DES POISSONS PEU OXYGÉNÉS

Autour de Natalya Gallo, les océanographes de l'institut Scripps, en Californie, viennent de découvrir deux espèces de poisson capables de survivre quasiment sans oxygène. D'après les constatations faites récemment par Nicholas Rogers, de l'université d'Exeter, un poisson a besoin d'une pression partielle d'oxygène comprise entre 1 et 16 kilopascals pour respirer. Pourtant, près de la côte Pacifique de l'Amérique, *Cherublemma emmelas*, une sorte d'anguille, et *Cephalurus cephalus*, un petit requin, se contentent de seulement 0,1 kilopascal dans leur habitat, situé entre 600 et 900 mètres de profondeur. Selon les chercheurs, les branchies surdéveloppées de ces deux espèces n'expliquent pas tout de cette adaptation extrême: celle-ci pourrait aussi inclure une forme de respiration anaérobie. ■

E.S.

N. Gallo et al., *Ecology*, en ligne le 27 novembre 2018

GÉOPHYSIQUE

UN NOYAU SOLIDE TARDIF?

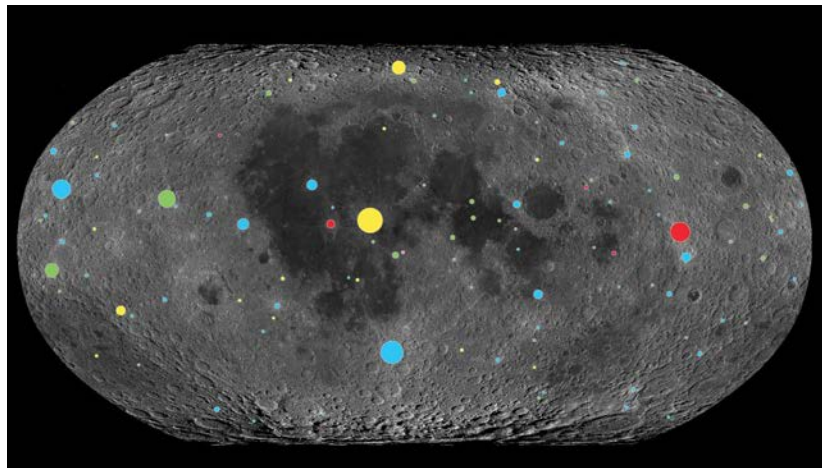
Richard Bono, de l'université de Rochester, aux États-Unis, et des collègues ont mesuré l'aimantation résiduelle de roches âgées de 565 millions d'années de la région de Sept-Îles, au Québec. Leurs résultats suggèrent que pendant 75 millions d'années, le champ magnétique terrestre a eu une orientation erratique et une intensité plus de dix fois inférieure à celle d'aujourd'hui. Selon les chercheurs, l'interprétation la plus simple est que la convection du fer liquide, à l'origine de la dynamo terrestre, était sur le point de s'arrêter sous l'influence de la cristallisation débutante du noyau solide de la Terre; un phénomène à déterminer – chaleur radiogénique, précipitation de certains composants? – aurait ensuite relancé la convection et ainsi la dynamo terrestre. Cette interprétation implique que le noyau solide serait 2 à 3 fois plus jeune qu'on ne le pensait jusque-là. Elle reste à confirmer par l'étude expérimentale du fer liquide et par la simulation numérique de la dynamo terrestre. ■

F.S.

R. Bono et al., *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 143-147, 2019

PLANÉTOLOGIE

DE LA LUNE À LA TERRE, UNE HISTOIRE D'IMPACTS



Les impacts de la Lune vieux de moins d'un milliard d'années sont représentés en taille et en âge par des pastilles de couleur. Les bleus, les plus nombreux, ont moins de 290 millions d'années.

Jusqu'à présent, les chercheurs pensaient que le registre des cratères sur Terre n'était pas fiable en raison de l'érosion, qui aurait effacé les cratères les plus anciens. Cette hypothèse semblait confirmée par la rareté des impacts vieux de plus de 300 millions d'années. Or étudier la répartition dans le temps des cratères d'impact aiderait à mieux connaître l'histoire passée de la Terre (certaines collisions ont provoqué des transformations majeures des conditions de surface et conduit à des extinctions massives d'espèces) et estimer les risques de collisions géantes dans le futur.

Comment reconstruire cette histoire passée? Une façon est d'étudier la surface lunaire car, du fait de leur proximité, la Terre et la Lune ont été exposées au même flux d'impacts. Pour dater les cratères d'impacts à la surface de notre satellite, Sara Mazrouei, de l'université de Toronto, et ses collègues ont utilisé des données de radiométrie thermique acquises par la sonde LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) évoluant autour de la Lune. En effet, lors d'un impact, de la roche initialement enfouie est éjectée et exposée à la surface. Du fait de l'impact, cette roche est plus chaude que la surface elle-même et la mesure de son abondance dans les cratères fournit une estimation de leurs âges.

Sara Mazrouei et ses collègues ont étudié plus d'une centaine de cratères de grande taille (de diamètre supérieur à 10 kilomètres). Ils en ont déduit que le rythme des impacts était 2,6 fois plus élevé dans les 300 derniers millions d'années que durant les 700 millions d'années qui ont précédé. Des collisions géantes dans la ceinture principale d'astéroïdes, dont les fragments auraient été déviés de leur orbite initiale vers la Lune et la Terre, expliqueraient cette hausse du rythme des impacts. Cette hausse rendrait aussi compte du déficit présumé de cratères anciens sur Terre, déficit dont l'érosion ne serait donc pas responsable. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

S. Mazrouei et al., *Science*, vol. 363, pp. 253-257, 2019

ASTROPHYSIQUE

DES QUASARS POUR MESURER LA CONSTANTE DE HUBBLE

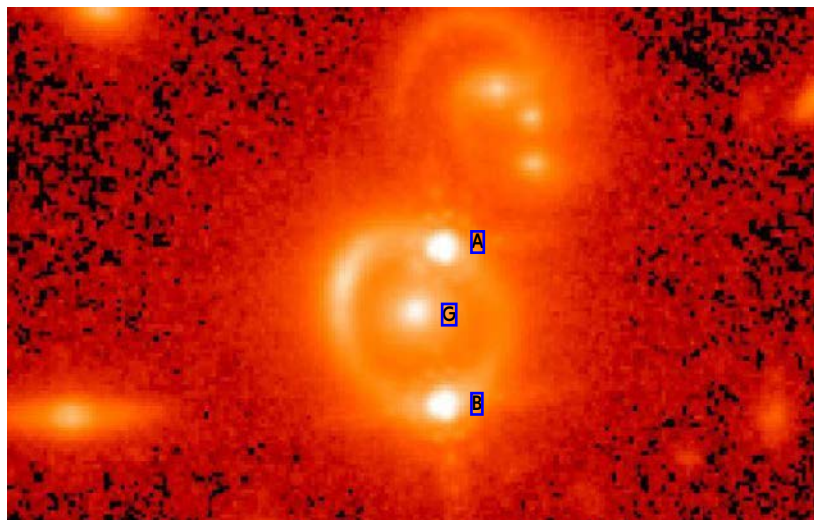
Deux méthodes sont en désaccord sur la valeur de cette grandeur qui décrit l'expansion de l'Univers. L'étude des quasars offre une technique indépendante pour la mesurer.

L'Univers est en expansion. Et depuis 1998, les astrophysiciens savent que cette expansion a commencé à s'accélérer il y a quelques milliards d'années. Pour mieux comprendre cette dynamique, les chercheurs tentent de déterminer la valeur précise du taux d'expansion actuel de l'Univers, que l'on nomme la « constante de Hubble ».

Grâce, en particulier, aux observations du télescope spatial *Planck*, l'analyse du fond diffus cosmologique (la lumière émise dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans) conduit à une constante de Hubble de 67,4 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Mais une méthode s'appuyant sur une mesure directe de la distance des supernovæ de type Ia (des explosions d'étoiles naines blanches) évalue cette constante à 73,5 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Ces deux valeurs sont incompatibles, même en prenant en compte les incertitudes associées. Or la source de cette incompatibilité reste inconnue à ce jour.

Pour y voir plus clair, Simon Birrer, de l'université de Californie à Los Angeles, et ses collègues de la collaboration *HoLiCOW* ont étudié une méthode indépendante, reposant sur les quasars, pour estimer la constante de Hubble. Les quasars sont des galaxies dont le centre est occupé par un trou noir supermassif très actif. De grandes quantités de matière s'y précipitent tout en émettant un fort rayonnement électromagnétique. Les quasars sont les objets les plus brillants de l'Univers et peuvent être observés jusqu'aux confins de celui-ci, jusqu'à des régions où le cosmos n'était âgé que de 2 milliards d'années.

En 2017, la collaboration *HoLiCOW* a montré qu'il est possible d'estimer la constante de Hubble en observant des quasars dont on obtient quatre images différentes par un effet de lentille gravitationnelle. En effet, en accord avec la relativité générale, une galaxie (ou un amas de galaxies) déforme l'espace-temps dans son voisinage et dévie la lumière provenant d'un objet en arrière-plan, un quasar par exemple. Suivant la distribution de la masse de la galaxie (ou de l'amas), la lumière de ce quasar nous arrive par plusieurs chemins et forme autant d'images de cet objet. Et lorsque



Grâce à un effet de lentille gravitationnelle dû à une galaxie (notée G), les astrophysiciens observent deux images (les points A et B) du quasar SDSS 1206+4332, situé en arrière-plan.

la lumière du quasar fluctue, celle de ses images fluctue aussi, mais pas de façon synchrone, car les différents chemins que la lumière parcourt ne sont pas de même longueur. En mesurant le délai entre les fluctuations des différentes images et en modélisant le trajet de la lumière, il est possible de calculer la constante de Hubble.

Simon Birrer et ses collègues ont étudié SDSS 1206+4332, un quasar lentillé dont on ne voit que deux images, mais dont les mesures ont des incertitudes faibles. Les chercheurs ont montré qu'un tel système à deux images peut être aussi efficace que ceux à quatre images (qui ont l'inconvénient d'être beaucoup plus rares) pour mesurer la constante de Hubble. La valeur calculée par la collaboration *HoLiCOW* est de 72,5 kilomètres par seconde et par mégaparsec. « En termes statistiques, commente Vivien Bonvin, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et membre de l'équipe, notre résultat corrobore plutôt celui obtenu grâce aux supernovæ, mais il est trop tôt pour conclure. Un important travail sur les incertitudes des uns et des autres est encore nécessaire pour comprendre ces différences. » ■

S. B.

S. Birrer et al., *MNRAS*, en ligne, le 22 janvier 2019

L'EFFET DES VOLCANS
NON TROPICAUX

Un préjugé veut que les volcans des zones tempérées ou polaires aient un moindre effet sur le climat. À partir des enregistrements contenus dans les glaces, Matthew Toohey, du centre Helmholtz pour la recherche océanique, à Kiel, en Allemagne, et des collègues viennent de montrer que, depuis l'année 750, les volcans extratropicaux ont produit, à injections égales de composés soufrés dans l'atmosphère, des refroidissements nettement plus grands que ceux causés par les volcans tropicaux.

20 MILLIONS
D'ANNÉES DE HOP

Hop, hop, hop fait le kangourou. Depuis quand ? Autour de Wendy Den Boer, du Muséum d'histoire naturelle de Stockholm, des chercheurs ont analysé l'astragale et le quatrième doigt de pied d'un marsupial fossile de plus de 20 millions d'années. Le résultat suggère que l'animal pouvait déjà pratiquer la locomotion par sauts caractéristique des kangourous, que l'on pensait plus récente de 10 millions d'années.

CHINCHERO, SITE
INCA OU AÉROPORT ?

La construction imminente d'un aéroport pour drainer les touristes en pays inca menace une série de sites... incas. Plus de 200 experts de cette civilisation apparue vers 1300 viennent d'appeler le président péruvien à déplacer l'emplacement de la structure, actuellement prévu à Chinchero, en plein milieu d'une région très riche en vestiges archéologiques. L'endroit comporte en particulier nombre d'établissements royaux extrêmement bien conservés et des terrasses de cultures d'époque inca, toujours utilisées.

UN DOPAGE
ORGANIQUE

L'électronique moderne est avant tout constituée de silicium. Les dispositifs à base de composés organiques, comme les écrans à diodes électroluminescentes organiques (Oled) sont encore très peu utilisés, car les performances des semi-conducteurs organiques sont limitées par un dopage moins efficace. De fait, pour fonctionner, les semi-conducteurs sont « dopés » : l'adjonction de certaines espèces chimiques ajoute des électrons ou en enlève (ou ajoute des « trous ») pour rendre le matériau conducteur. En explorant de nouvelles stratégies de dopage, David Kiefer, de l'université technologique Chalmers, en Suède, et ses collègues ont mis au point un semi-conducteur organique où les molécules dopantes fournissent plus de charges électriques.

Les semi-conducteurs organiques sont des polymères, tels les plastiques, dont la structure est électriquement conductrice. Leur dopage est assuré par l'adjonction de molécules. Mais jusqu'à présent, le dopage n'y transférait généralement qu'une seule charge (électron ou trou) pour dix molécules dopantes environ, alors que dans les semi-conducteurs classiques, à base de matériaux inorganiques tels que le silicium, chaque atome dopant apporte une charge au système.



Hormis les écrans Oled, peu de dispositifs utilisent l'électronique organique du fait d'un rendement faible.

L'équipe de David Kiefer a choisi une molécule dopante, F6TTCNNQ, pour laquelle la capture, non pas d'un, mais de deux électrons est énergétiquement favorable. En l'utilisant pour doper un polymère, p(g42T-TT), où l'énergie nécessaire pour arracher un électron est faible, ils ont formé un semi-conducteur très performant pour lequel l'efficacité du dopage s'élève à 17 charges transférées pour 10 molécules dopantes. Les Oled, mais aussi les cellules photovoltaïques organiques, et les autres dispositifs électroniques organiques devraient bénéficier de ce résultat. ■

MARTIN TIANO

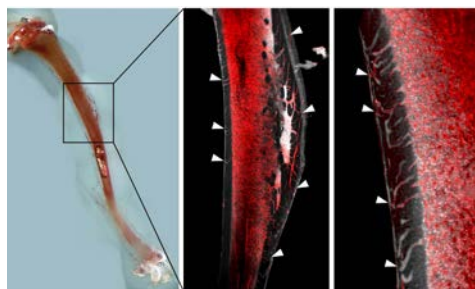
D. Kiefer et al., *Nature Materials*, vol. 18, pp. 149-155, 2019

MICROVAISSEAUX
DANS L'OS

Les cellules du système immunitaire produites par la moelle osseuse parviennent très rapidement à la circulation sanguine.

Or les modèles existants ne font état que d'un nombre limité d'entrées artérielles et de sorties veineuses dans les os. Grâce à des techniques de pointe d'imagerie, la microscopie à feuillet de lumière et la microscopie à rayons X, Anika Grüneboom et ses collègues, de l'université de Duisbourg et Essen, en Allemagne, ont mis au jour et caractérisé tout un réseau de centaines de microcapillaires sanguins dans la section perpendiculaire des os longs, chez la souris.

Les chercheurs ont montré que plus de 80% du flux artériel et près de 60% du flux veineux passent par ces microvaisseaux, et non par les vaisseaux principaux anciennement décrits.



En rendant l'os de souris transparent, les chercheurs ont mis en évidence un réseau de microvaisseaux sanguins.

Les chercheurs ont aussi étudié le rôle de ces microvaisseaux dans les pathologies articulaires de l'os telles que l'arthrite, une destruction chronique inflammatoire de l'os. Comme les microvaisseaux véhiculent directement des cellules inflammatoires sur l'os, de nouvelles stratégies thérapeutiques pourraient consister à bloquer cet arrivage. ■

NOËLLE GUILLON

A. Grüneboom et al., *Nature Metabolism*, en ligne le 21 janvier 2019

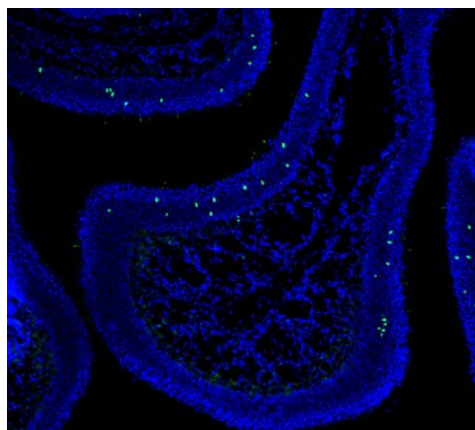
GÉNÉTIQUE

EXPRESSIONS SÉLECTIVES

La capacité des humains à distinguer de nombreuses odeurs s'appuie sur 400 gènes codant des récepteurs olfactifs (1000 chez la souris). Mais chaque neurone olfactif n'exprime qu'un seul type de récepteur olfactif. Or ces gènes sont situés sur divers chromosomes, et l'on pensait que des gènes portés par des chromosomes différents interagissaient peu. Comment s'opère alors le choix de l'unique gène exprimé dans chaque neurone? Kevin Monahan, de l'université Columbia, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que des regroupements interchromosomiques, à la fois des gènes de récepteurs olfactifs et de leurs gènes activateurs, contribuent à cette sélection.

Grâce à une technique d'imagerie qui permet d'analyser l'organisation spatiale dans le noyau cellulaire de la chromatine (la structure dans laquelle l'ADN est compacté), les chercheurs ont montré que les chromosomes interagissent bien plus qu'on ne le pensait. Ainsi, les gènes codant les récepteurs olfactifs et leurs activateurs, bien que situés sur différents chromosomes, se rassemblent en amas denses, les regroupements interchromosomiques.

Kevin Monahan et ses collègues ont précisé, chez la souris, que les regroupements interchromosomiques de gènes olfactifs se



Sur cette coupe de l'épithélium olfactif, dans la cavité nasale, les neurones exprimant le récepteur olfactif Olfr17 sont marqués (en vert).

forment dans un état intermédiaire de développement du neurone. L'expression de ces gènes est alors inhibée. Puis, dans les neurones olfactifs matures, grâce à l'action d'un complexe protéique spécifique, les gènes activateurs forment un amas distinct d'où ils contrôlent l'expression d'un unique gène codant un récepteur olfactif. Bien que spécifique à l'odorat, cette découverte suggère que les interactions interchromosomiques pourraient jouer un rôle central dans des mécanismes de sélection de gènes assurant d'autres fonctions. ■

ALINE GERSTNER

K. Monahan et al., *Nature*, vol. 565, pp. 448-453, 2019

BIOLOGIE VÉGÉTALE

LES FEUILLES SE REBIFFENT

Malgré leur immobilisme apparent, les végétaux sont loin d'être démunis face aux stress de l'environnement tels que sécheresse, salinité ou infections bactériennes. Par exemple, la production d'acide abscissique dans les feuilles permet d'activer des mécanismes qui limitent les pertes en eau, tandis que l'acide salicylique induit l'émission de substances bactéricides. Cependant, Kenichi Tsuda et ses collègues, de l'institut Max-Planck à Cologne, en Allemagne, ont montré que les feuilles jeunes d'*Arabidopsis thaliana*, l'arabette des dames, étaient plus robustes contre les bactéries, tandis que les vieilles résistaient mieux au sel. Ils ont de plus précisé les mécanismes biochimiques qui régulent la concentration des acides abscissique et salicylique en fonction de l'âge de la feuille.



Selon leur âge, les feuilles d'*Arabidopsis thaliana* se défendent différemment contre les stress extérieurs.

Mais quel avantage présente cette défense? Les chercheurs ont constaté que produire les deux substances simultanément est très coûteux pour la plante. Puis ils ont montré qu'une attaque bactérienne ralentissait la croissance, tandis que la salinité réduisait la production de fruits. La défense modulée selon l'âge des feuilles offre donc à la plante le meilleur compromis. ■

CORALINE MADEC

M. L. Berens et al., *PNAS*, vol. 116(6), pp. 2364-2373, 2019

EN BREF

DES MÉTASURFACES ACOUSTIQUES

Thomas Brunet, de l'université de Bordeaux, et ses collègues ont développé un nouveau type de métasurface acoustique. Elle est constituée d'un élastomère à base de silicone et sa porosité contrôle son indice de réfraction acoustique. Le matériau est souple, peu coûteux, simple à utiliser et opère dans l'eau et sur une large bande de fréquences ultrasonores. Il permet par exemple de focaliser des ondes sonores ou de produire des « vortex acoustiques » qui agissent comme des pinces pour manipuler à distance de petits objets, comme des cellules biologiques.

UN ROBOT, ROI DE LA CONSTRUCTION

Le jeu Jenga consiste en une tour formée de blocs de bois dont les joueurs doivent ôter un élément et le placer en haut de la structure sans la faire s'effondrer. Nima Fazeli et ses collègues, du MIT, ont développé un bras robotisé, piloté par une intelligence artificielle, qui a appris à jouer à ce jeu. L'originalité de ce dispositif est qu'il utilise des stimuli visuels et tactiles pour choisir la pièce à déplacer.

UN PAPILLON SOURD ET BRUYANT

Une stratégie évolutive de défense contre les prédateurs consiste à prévenir ces derniers qu'on a mauvais goût. Si le signal prend souvent la forme de couleurs vives, il est souvent ultrasonore pour les papillons de nuit. Par exemple, quand *Arachnis aulaea* détecte une chauve-souris, il actionne des muscles reliés à un système qui émet des ultrasons. Liam O'Reilly, de l'université de Bristol, et ses collègues ont découvert que des papillons du genre *Yponomeuta*, sourds donc incapables de détecter les chauves-souris, ont une structure particulière sur leurs ailes, qui produit des ultrasons en permanence quand ils volent.

Cette année, la Société française de physique a choisi de distinguer Azar Khalatbari pour son travail de journaliste scientifique. Responsable des sciences de l'Univers du magazine *Sciences et Avenir*, elle donnera une conférence sur les méandres du métier de journaliste scientifique, à travers des exemples d'actualités sur la physique et l'astrophysique.

EN PARTENARIAT AVEC



Palais
DÉCOUVERTE

prix Jean Perrin : la vulgarisation récompensée

remise de prix et conférence accès gratuit

— mercredi 13 mars à 19h



© C. L. et L. L.

Palais
DÉCOUVERTE

©2018 Cameron Beccario

remuer ciel et Terre

cycle de conférences accès gratuit

— les mercredis à 19h

©2018 Cameron Beccario

20 mars

Les courants marins changent de cap

Didier Swingedouw, climatologue, université de Bordeaux, CNRS.

27 mars

Croûte terrestre : craquements et tremblements

Pascal Bernard, sismologue et physicien du Globe à l'Institut de physique du Globe de Paris (IPGP).

3 avril

Parker Solar Probe : au plus près du Soleil

Thierry Dudok de Wit, enseignant-chercheur, CNRS, université d'Orléans.

10 avril

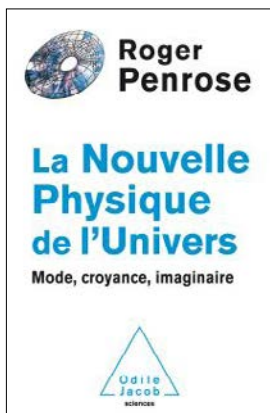
Gravity : observer le centre de la galaxie pour tester les théories

Guy Perrin, astronome, Observatoire de Paris.

17 avril

Mouvements contraires : des super-amas à l'expansion de l'Univers

Mickaël Rigault, chargé de recherche CNRS/IN2P3.



COSMOLOGIE

LA NOUVELLE PHYSIQUE DE L'UNIVERS

Roger Penrose

Odile Jacob, 2018

576 pages, 39 euros

La science est une méthode visant à construire un savoir commun sur

la nature. Il s'agit d'une activité humaine, dont les développements sont sujets aux modes, aux croyances et à l'imaginaire. C'est ce que nous montre ici le célèbre physicien Roger Penrose en nous invitant dans les coulisses de la recherche sur les théories physiques et cosmologiques.

Les modes naissent de l'espoir que suscitent les potentialités de théories souvent encore non abouties; comme au temps des ruées vers l'or, on voit des domaines prometteurs attirer des chercheurs curieux d'explorer leurs implications; ils réalisent parfois de belles avancées, mais, le plus souvent, la source d'idées stimulantes se tarit et la mode passe.

L'imaginaire, ensuite, est au cœur de la recherche dans des disciplines qui révèlent des propriétés de la nature; il nous aide à naviguer dans des théories abstraites, à parier sur les façons dont le monde pourrait être et donc à choisir les thèmes sur lesquels passer du temps.

Quant aux croyances, elles sont source d'inertie, car accepter de nouvelles idées implique d'accepter aussi une nouvelle vision du monde, de sorte que, souvent, les théories portent plus loin que le regard de ceux qui les formulent.

Rompu à ces réalités sociales

de la recherche théorique, Roger Penrose louvoie dans ce livre entre consensus et spéculations. Il aborde aussi bien le modèle du Big Bang et de l'inflation que la théorie des twisteurs chère à son cœur, en touchant aussi à de nombreux aspects de la théorie des cordes. Il consacre aussi de bonnes pages à la cosmologie conforme cyclique, l'une des dernières idées qu'il essaie de promouvoir. Dans son style singulier, il expose ses réflexions sur les théories modernes, leur futur, sans éluder leurs aspects et leur vocabulaire techniques.

JEAN-PHILIPPE UZAN

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS

ÉCOLOGIE-CLIMATOLOGIE

DRAWDOWN - COMMENT INVERSER LE COURS DU RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE

Paul Hawken (dir.)

Actes Sud, 2018

576 pages, 35 euros

De plus en plus de citoyens sont convaincus de la réalité

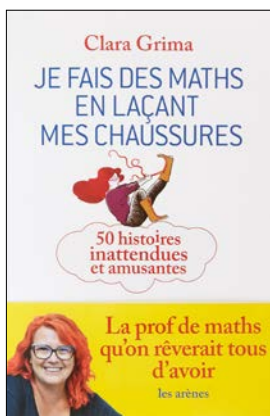
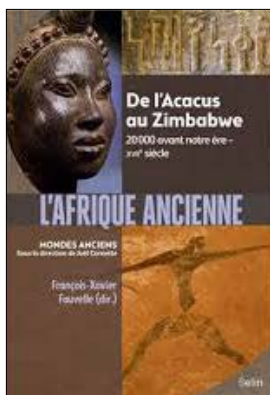
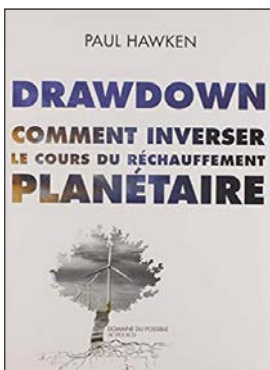
du changement climatique et de ses causes anthropiques. Vu l'urgence, il est bienvenu de présenter des solutions pratiques allant au-delà de l'implantation de «panneaux solaires et d'ampoules de basse consommation». Rédigé par 70 acteurs de la recherche et des politiques publiques, ce livre présente un plan pour inverser en trente ans l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Tous ces acteurs sont membres d'un réseau coordonné par Paul Hawken, un spécialiste de l'environnement qui ne mâche pas ses mots: «Il est certes difficile d'assister à l'effondrement toujours plus rapide de nos systèmes environnementaux ou d'être témoin de la désintégration mondiale de la civilisation qui se fracture en partis, en idéologies et en guerres. Ce qui nous attend n'est pas le choix d'un camp ou de l'autre, mais la prise de conscience que nous sommes les gardiens de la planète. Soit nous lutterons, tous ensemble, contre le réchauffement planétaire, soit, selon toute probabilité, notre espèce disparaîtra.»

Quatre-vingts propositions

concrètes sur l'énergie, l'alimentation, le bâtiment, l'agronomie, le transport sont passées en revue. Leur contribution à l'ensemble du projet est chiffrée. Certaines des mesures proposées dans cette feuille de route à l'usage des gouvernements, des collectivités et des particuliers sont inattendues: éducation des filles, planning familial... Leur efficacité dans la réduction de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone serait pourtant première!

PIERRE JOUVENTIN

ÉTHOLOGUE ÉMÉRITE AU CNRS



ARCHÉOLOGIE

L'AFRIQUE ANCIENNE

François-Xavier Fauvelle (dir.)

Belin, 2018

680 pages, 49 euros

Le titre de cet ouvrage magistral aurait pu être « Histoire mondiale de l'Afrique ». Dirigés par le célèbre historien de l'Afrique François-Xavier Fauvelle, les auteurs montrent bien que les civilisations africaines furent à divers degrés parties prenantes des premiers systèmes-mondes (des premières mondialisations) qui se sont succédé depuis l'Antiquité.

Trois parties le constituent. La première couvre la chronologie allant de l'origine de la civilisation de l'Égypte pharaonique jusqu'à l'ouverture de la traite atlantique au XVII^e siècle, en passant par la Nubie, l'Éthiopie, le monde swahili, les États islamisés d'Afrique subsaharienne, le creuset des civilisations forestières du golfe de Guinée, etc. L'aspect historique de cette première partie n'empêche pas de passionnantes réflexions sur la nature profonde de l'écrit dans ce continent ou sur les mécanismes ayant mené à l'ouverture de la traite atlantique.

Thématisée, la seconde partie traite des phénomènes à l'origine de la diversité culturelle depuis 20 000 ans. On y trouvera notamment des chapitres synthétiques sur le pastoralisme, la métallurgie, les chasseurs-cueilleurs... En mettant l'accent sur le temps long des processus, les auteurs de cette seconde partie rééquilibrent le propos en faveur des sociétés orales, quelque peu obliées dans la première partie par la surreprésentation des sociétés avec écriture.

Intitulée « L'atelier de l'historien », la dernière partie interroge et complète les démarches diachroniques propres aux historiens et aux archéologues.

Au final, un remarquable ouvrage – l'un des rares disponibles sur l'histoire du plus grand des continents –, où l'on ne cesse d'être ébloui par la tenue des textes et par la qualité d'illustrations toujours choisies avec tact.

GEOFFROY DE SAULIEU
PALOC, IRD, PARIS

MATHÉMATIQUES

JE FAIS DES MATHS EN LAÇANT MES CHAUSSURES

Clara Grima

Arènes, 2018

315 pages, 20 euros

La vulgarisation scientifique est un art difficile que Clara Grima, enseignante-chercheuse espagnole, maîtrise parfaitement. Elle propose une série de textes courts (quelques pages) et illustrés sur les mathématiques cachées dans notre quotidien.

On apprend ainsi l'existence de 43 200 façons différentes de lacer ses chaussures et lesquelles sont les plus solides ou nécessitent la plus petite longueur de lacet. Plusieurs exemples portent sur les réseaux : réseaux sociaux, Twitter, Facebook, le théorème de Frobenius et le moteur de recherche de Google, les réseaux des personnages de *Game of Thrones* qui permet de découvrir que le personnage le plus important lors des premières saisons n'est pas la célèbre Khaleesi !

Mais Clara Grima donne aussi des applications concrètes : la propagation des épidémies selon un réseau de voisins et pourquoi les vaccins restent utiles. On apprend également comment fonctionne le codage des images par Jpeg, la localisation par GPS ou comment faire passer un canapé le plus grand possible dans un couloir en L. Plus original, on découvre qu'on peut « entendre » la forme d'un tambour, c'est-à-dire que deux tambours de formes différentes ne produisent pas le même son.

Ce livre instructif et agréable à lire, riches de dessins clairs, donne de nombreux exemples de l'intérêt des mathématiques pour comprendre le monde contemporain.

PIERRE BERTRAND
LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES,
UNIVERSITÉ CLERMONT-AUVERGNE

ET AUSSI



SUPERNOVA

Marco Zito

Belin, 2018

236 pages, 19 euros

Physicien à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA, l'auteur nous raconte comment les astronomes ont, de siècle en siècle, observé et interprété les phénomènes surprenants du ciel nocturne que sont les supernovæ. Il explique ensuite comment, au XX^e siècle, après que les astrophysiciens ont compris comment les éléments sont formés dans les étoiles et les éléments lourds dans les supernovæ, ils ont enfin réussi à modéliser efficacement ces étoiles explosives.

ERECTUS

Xavier Müller

XO, 2018

440 pages, 19,90 euros

Comment réagirions-nous si un virus faisait régresser le vivant contaminé – y compris les humains – à un stade préhistorique ? C'est la question que pose l'auteur de ce roman d'anticipation. Journaliste scientifique, il y répond dans un thriller à la fois haletant et documenté, où les recherches, la découverte du virus, l'effarement, la panique, les décisions sont racontées à toutes les échelles, de l'individu à la planète. À l'exception du virus, les faits scientifiques sur lesquels repose l'histoire sont avérés... et les rouages des décisions de santé publique tout à fait plausibles.

MOGOK, LA VALLÉE DES PIERRES PRÉCIEUSES

Kennedy Ho

Glénat, 2018

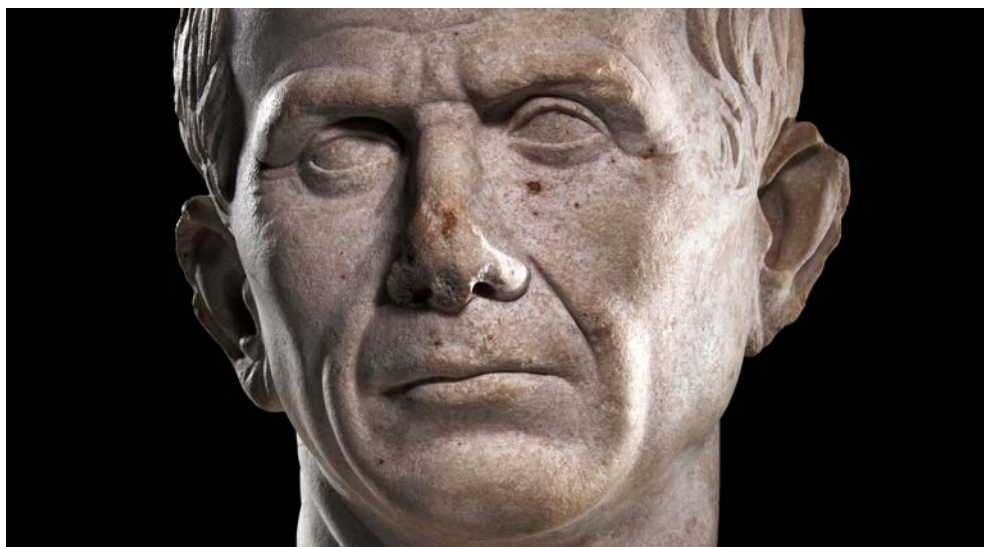
192 pages, 39,50 euros

Les fameux rubis des joyaux mérovingiens provenaient de Birmanie. Là, la vallée de Mogok concentre artisanat minier traditionnel et semi-industriel. Ce reportage scientifique sous forme de beau livre fascine en nous révélant l'industriel et habile artisanat des populations locales. Depuis des milliers d'années, elles fournissent les lapidaires du monde entier, mais aussi la géologie et la science des rubis, péridots et autres saphirs.

GENÈVE

JUSQU'AU 26 MAI 2019
Musée d'art et d'histoire
www.mah-geneve.ch

César et le Rhône



En 46 avant notre ère, Jules César fonda la colonie d'Arles, sur le Rhône, qui a prospéré durant trois siècles. Devenue un port méditerranéen important, relié par le même fleuve à Genève, porte d'entrée vers l'Europe septentrionale, Arles la romaine a laissé de nombreux vestiges et objets. Certaines de ces pièces n'ont été découvertes que très récemment lors de fouilles subaquatiques, tel ce buste (*ci-dessus*) représentant peut-être Jules

César et qui a été mis au jour en 2007. L'exposition présente plus de 400 pièces remarquables provenant notamment du Musée départemental Arles antique et du musée du Louvre, ainsi que des collections du musée genevois. Immérgé dans le passé d'Arles et de Genève, le public pourra par exemple admirer, outre le buste présumé de Jules César, de belles statuettes en bronze, des objets du quotidien, une rare roue de chariot, un coffret en bois... ■

GRENOBLE

JUSQU'AU 28 JUILLET 2019
Muséum de Grenoble, La Casemate et le campus
www.lesmondesinconnus.fr

Les mondes inconnus



Décollage immédiat ! Après l'obtention de votre permis pour l'espace, vous embarquez en tant que membre d'équipage de l'Osgus. Il vous faudra alors résoudre des énigmes, poser votre vaisseau et vous assurer que tout ira pour le mieux sur votre nouvelle planète. L'occasion pour le jeune public de découvrir notre galaxie, d'expérimenter et de toucher Mars et la Lune. ■

FRANCE ET AILLEURS

DU 11 AU 17 MARS 2019
Lieux divers
www.semaineducerveau.fr

Semaine du cerveau



Pour sa vingt et unième édition, ce rendez-vous des neurosciences, devenu incontournable, continue d'explorer notre cerveau. Dans toute la France, des spécialistes débattent avec le public sur des thèmes tels que l'addiction, le rôle des astrocytes ou l'intelligence artificielle, à la lumière des dernières découvertes de la science. ■

ET AUSSI

Mercredi 6 mars, 14 h
UFR de droit, université de Poitiers
<https://emf.fr/>
Tél. 05 49 45 30 00

CRÉATIONNISME ET CONSPIRATIONNISME

Thomas C. Durand, ex-chercheur en biologie, écrivain et auteur de la chaîne YouTube « La Tronche en biais », souligne une mécanique de la croyance commune au créationnisme et au conspirationnisme.

Jeudi 14 mars, 12 h 30
Université Paul-Sabatier, Toulouse

IDÉES REÇUES ET VACCINS

Nicolas Fazilleau, chercheur à l'Inserm, explique quels sont les différents types de vaccins, précise leur efficacité et commente les idées reçues qui ont beaucoup circulé récemment.

Vendredi 15 mars, 18 h
Thonon-les-Bains (74)
www.univ-smb.fr/amphis
COMMUNICATION DES PLANTES

Geneviève Chiapusio, de l'université de Franche-Comté, explique ce que l'on sait du langage chimique utilisé par les plantes pour interagir avec leur environnement. Également le jeudi 21 mars à Albertville.

Mardi 19 mars, 20 h 30
Muséum de Nantes
www.museum.nantes.fr
LES VIRUS MARINS

Une conférence sur les virus qui vivent dans les océans et leur place dans l'écosystème, par Anne-Claire Baudoux, chercheuse du CNRS à la station biologique de Roscoff.

Mardi 26 mars, 20 h 30
Les Champs Libres, Rennes
www.espace-sciences.org
ILS ONT MARCHÉ SUR LA LUNE

Philippe Henarejos, journaliste scientifique et auteur du livre éponyme, retrace les principaux aspects des explorations menées lors des six expéditions lunaires.

PARIS

JUSQU'AU 11 AOÛT 2019
Palais de la Découverte
www.palais-decouverte.fr

Poison



Les minéraux, les plantes et les animaux présentent une multitude de substances toxiques. Sans ignorer les deux premières classes, cette exposition se concentre sur les poisons d'origine animale. Son principal intérêt réside dans les terrariums qui montrent au public trente espèces vivantes, parmi les plus vénéneuses ou venimeuses: le célèbre mamba noir et d'autres serpents redoutables, des grenouilles joliment colorées qui exsudent du poison à travers leur peau, des mygales, des scorpions, des punaises... Et l'on apprendra notamment que cinq mammifères sont venimeux et trois oiseaux sont toxiques. ■

PARIS

EXPOSITION PERMANENTE
Aquarium de Paris
www.aquariumdeparis.com

Médusarium

Après trois ans de travaux, le médusarium de l'Aquarium de Paris vient d'être inauguré. Cette installation qui présente des méduses bien vivantes se hisse au rang des quatre ou cinq aquariums dans le monde où l'on peut voir évoluer avec grâce autant d'espèces. Car l'élevage de méduses est complexe et nécessite un savoir-faire particulier – que le personnel de l'Aquarium de Paris est allé perfectionner auprès des grands experts, au Japon.

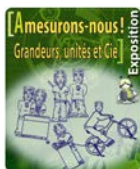
Ainsi, vingt-quatre bassins de présentation montrent une vingtaine d'espèces de méduses (choisies par roulement parmi la cinquantaine qui sont élevées au laboratoire, lequel est équipé d'une centaine de bassins). Le visiteur



peut ainsi assister au spectacle magique des pulsations de ces organismes si beaux et si fragiles, tout en se familiarisant avec le cycle de vie, la biologie et l'écologie de ces cnidaires. Et cela sans craindre leurs piqûres, plus ou moins redoutables selon les espèces! ■

CHARLEROI (BELGIQUE)

JUSQU'AU 6 SEPTEMBRE 2019
Centre de culture scientifique
www.ulb.ac.be/ccs-nouveau/



Amesurons-nous!

C'est un voyage dans le temps et dans l'espace que nous offre cette exposition. Coudée, boisseau, muid, litron... autant de termes fleuris pour donner les mesures d'une époque révolue. La normalisation et l'étalonnage donnent lieu à des expérimentations (pour les plus jeunes), mais surtout offrent une réflexion plus large sur l'utilité de mesurer pour mieux communiquer. Un voyage d'initiation à la découverte de la métrologie et du rôle indispensable qu'elle joue dans la société. ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 2 mars, 14 h 30
Saint-Herblain (44)
Tél. 02 40 50 13 44
www.bretagne-vivante.org

BRYOPHYTES, FOUGÈRES, LICHENS

Il n'y a pas que les conifères et les plantes à fleurs dans la vie ! Cette sortie est l'occasion de faire connaissance avec des végétaux plus discrets, et néanmoins fascinants.

Samedi 2 mars, 20 h
Saint-Sulpice (Lot)
Tél. 05 65 22 28 12

MYSTÈRES AU CRÉPUSCULE

Une excursion pour découvrir, dans les Causses du Quercy, le monde envoûtant de la nuit et les animaux plus ou moins connus qui l'animent.

Samedi 16 mars, 19 h 45
Huriel (Allier)
Tél. 04 70 28 83 83
nuitdelachouette.lpo.fr

NUIT DE LA CHOUETTE

Comme dans le reste du pays, on célèbre ce mois-ci la chouette et ses cousins. Cette sortie de terrain est précédée d'une conférence sur les rapaces nocturnes.

Dimanche 24 mars, 9 h 30
Alpes-de-Haute-Provence
Tél. 06 20 28 29 65
www.cen-paca.org

TERRASSES GLACIAIRES

Balade géologique dédiée aux terrasses qui longent la Moyenne Durance.

Vendredi 29 mars, 19 h
Les Mayons (Var)
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org

À L'ÉCOUTE DES GRENOUILLES

Les grenouilles présentes en Provence font d'abord l'objet d'un diaporama en salle avant d'être recherchées sur le terrain, dans la plaine des Maures qui en abrite sept espèces.

Dimanche 31 mars, 9 h 30
Forêt de Nanteau-Poligny (Seine-et-Marne)
Tél. 01 64 22 61 17
www.anvl.fr

LICHÉNLOGIE

Une journée d'excursion dédiée aux lichens.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

EN MARS, MÉFIEZ-VOUS DE LA PARITÉ

Le « bit de parité » est une méthode simple de détection d'erreur dans un message. Un principe utilisé dans d'autres situations, mais qui n'est pas infallible !



A l'instar du bit de parité, les deux derniers chiffres du numéro de Sécurité sociale constituent une clé de contrôle pour détecter une erreur.

Il arrive qu'un canal de communication soit imparfait et que le message reçu par le destinataire soit un peu différent de celui envoyé par l'émetteur. Une façon de corriger de telles erreurs consiste à tripler chaque lettre et à envoyer, par exemple, le message « pppooooouurrlllaassscceciieennncceee ». Ainsi, quand une lettre est altérée lors de la transmission et que le message devient « pppooauurrlllaaassscceciieennncceee », il est facile de reconstituer le message original, car le triplet « ooa » est probablement une altération du triplet « ooo », qui exprime la lettre « o ». Le message n'est durablement altéré, ou rendu indéchiffrable, que si deux lettres du même triplet sont simultanément altérées, par exemple si « ooo » est altéré en « oaa » ou en « oab ».

Cette technique implique de tripler la taille des messages à transmettre. Une solution moins coûteuse consiste à simplement doubler chaque lettre : « ppooouurrlllaassscceciieennncceee ». Dans ce cas, il est impossible de corriger les erreurs, mais il est possible de les détecter : si, par

exemple, le message reçu est « ppoauurrlllaassscceciieennncceee », nous ne savons pas quelle était la deuxième lettre du message original, mais nous voyons qu'elle a été altérée et nous pouvons la redemander à l'expéditeur. À nouveau, le message n'est durablement altéré que si deux lettres du même couple sont altérées, si « oo » par exemple est altéré en « aa ».

L'idée elle-même existe depuis la nuit des temps

Mais même cette seconde méthode augmente trop la taille des messages. Une méthode plus économique consiste à associer un nombre de 0 à 25 à chaque lettre de l'alphabet, à ajouter les nombres correspondant à chaque lettre du message, à prendre le reste de la division de

ce nombre par 26 et à associer une lettre à ce nombre.

Par exemple, avec le message « pourlascience », nous obtenons $15 + 14 + 20 + 17 + 11 + 0 + 18 + 2 + 8 + 4 + 13 + 2 + 4 = 128$, dont le reste de la division par 26 est 24, qui correspond à la lettre « y ». Nous exprimons alors ce message en ajoutant cette unique lettre – dite « de parité » – à la fin : « pourlasciencey ». Pour vérifier que le message n'a pas été altéré, le destinataire n'a qu'à ôter cette dernière lettre, faire lui-même le même calcul et vérifier qu'il obtient, lui aussi, la lettre « y ». Si ce n'est pas le cas, par exemple s'il reçoit le message « paurlasciencey », il détectera l'erreur. Ajouter ainsi une seule lettre à un message de 13 lettres n'augmente sa longueur que de 8% et permet de détecter une erreur, sauf quand deux altérations simultanées se compensent. Cette méthode est souvent utilisée dans un système binaire (avec un alphabet de deux lettres) – d'où le nom de « lettre de parité » ou « bit de parité ».

Cette notion de « code correcteur d'erreur », c'est-à-dire l'introduction d'une redondance dans un message afin de détecter d'éventuelles erreurs de transmission, est souvent attribuée à Claude Shannon, qui l'a théorisée en 1948. Mais l'idée elle-même existe depuis la nuit des temps. Par exemple, dans l'expression des dates, nous pourrions écrire « le 1^{er} mai 2019 », mais nous écrivons souvent « le mercredi 1^{er} mai 2019 », où le jour de la semaine « mercredi » est redondant. Mais si le message est altéré en « le mercredi 2 mai 2019 », « le mercredi 1^{er} juin 2019 » ou « le mercredi 1^{er} mai 2020 », ce jour de la semaine nous permet de détecter l'erreur, car ces dates correspondent respectivement à un jeudi, un samedi et un vendredi.

Mais il est un cas où cette méthode ne marche pas : le 25 mars 2019 est un lundi et le 25 février 2019 aussi, car le mois de février dure 28 jours, qui est un multiple de 7. Si nous nous trompons en notant un rendez-vous en mars, l'erreur ne sera pas détectée : en mars, méfiez-vous de la parité. ■

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

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pouirlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€	79€ Au lieu de 114,40€	99€ Au lieu de 174,40€
	29 % de réduction*	31 % de réduction*	43 % de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG19STD



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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE
DÉCOUVERTE**
12 n° du magazine papier
59€
Au lieu de 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
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne
99€
Au lieu de 174,40€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°:

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

Signature obligatoire:

Reduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LA SCIENCE ET LE CHAT DU CHESHIRE

Il ne suffit pas de vulgariser les acquis scientifiques pour que le public les comprenne et y adhère. La perception qu'il a des institutions de la science joue un rôle clé.



Lors de son congrès annuel de 2008, l'Association américaine des centres de science et de technologie a consacré une session à la perception publique des controverses en science. Étonnés par l'imperméabilité de l'opinion à la méthode scientifique, directeurs de musées et éthiciens insistaient sur la nécessité d'orienter les centres de science vers la prise en compte des contenus controversés et des enjeux éthiques qui les structurent.

Dix ans plus tard, l'angoisse que suscite l'incompréhension des acquis scientifiques par le grand public reste d'actualité. Qu'il soit question d'écologie, d'énergie, de biotechnologies ou de sécurité des vaccins, la lente traversée des faits avérés est encore freinée par la cacophonie des énoncés pseudoscientifiques circulant dans certains médias et sur Internet.

En France, dans une tribune de *L'Express* publiée le 4 décembre dernier, 131 membres des académies des sciences, de médecine et de pharmacie ont rappelé que l'efficacité des produits homéopathiques n'a jamais été prouvée. Quelques

mois plus tôt, c'est presque autant de professionnels de santé qui dénonçaient dans *Le Figaro* les promesses fantaisistes des médecines alternatives.

Intuitivement, la vulgarisation scientifique apparaît comme le moteur premier d'une percolation du savoir vers les couches profondes de l'opinion. Mais en réalité, l'adhésion à la parole scientifique dépend de la confiance dans ceux qui la produisent.

L'adhésion au consensus scientifique dépend de la confiance dans les organismes de la science

Un rapport de l'Académie américaine des arts et des sciences publié en 2018 sur les perceptions de la science et une étude de 2017 menée par Caitlin Drummond et Baruch Fischhoff, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, défient nos idées

reçues. Ils montrent que l'adhésion des Américains aux conclusions des recherches sur les cellules souches, le Big Bang, l'évolution humaine ou le changement climatique est corrélée à l'identité politique ou religieuse des gens. Et cette polarisation est plus marquée chez ceux ayant un niveau élevé d'instruction et de culture scientifique! En revanche, elle disparaît quand les sujets abordés concernent le génie génétique ou les nanotechnologies.

C'est qu'une autre variable intervient fortement: l'adhésion au consensus scientifique dépend étroitement de la croyance en la fiabilité des organisations produisant et certifiant les savoirs. C'est ainsi, par exemple, que la remise en cause des expertises publiques encourage les traitements médicaux charlatanesques ou non homologués, en marge des disciplines instituées ou des cadres classiques de régulation du médicament.

Dans cette même veine, le dernier baromètre de la confiance politique du Cevipof (<https://bit.ly/2D2BfoL>) met en évidence que le populisme, défini par le rejet des institutions de la démocratie représentative, est une variable importante de la défiance vis-à-vis des activités scientifiques.

La confiance sociale dans la parole scientifique résulte donc d'un rapport entre un contenu et un cadre institutionnel incarnant le bien commun. On peut la lire comme une parabole du chat du Cheshire, ce malicieux personnage de Lewis Carroll qui disparaît à la fin des *Aventures d'Alice au pays des merveilles* en laissant son sourire accroché à un arbre.

Un sourire dénué de visage qui le porte évoque une image dont il est impossible de tracer les contours. De la même façon, un contenu scientifique sans l'ossature institutionnelle qui lui donne autorité incarne une simple opinion comme une autre. À l'instar d'Alice qui a «souvent vu un chat sans sourire, mais jamais un sourire sans chat», il nous faut apprendre à redessiner le visage souriant des institutions scientifiques dans un marché dérégulé de l'information où règne la confusion des légitimités. ■

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

NOUS AVONS UNE CONVICTION : LES RESSOURCES PÉDAGOGIQUES SONT AU SERVICE DE LA LIBERTÉ DES ENSEIGNANTS.

C'est pourquoi nous nous efforçons de comprendre **les besoins spécifiques de chacun.**

Notre mission est accomplie si nous mettons entre vos mains des solutions concrètes qui vous permettent de vous adapter à toutes les façons d'apprendre.

Ainsi, du manuel papier à nos offres numériques innovantes, nous proposons une gamme variée pour vous accompagner dans la mise en œuvre des **nouveaux programmes.** Issues d'un travail collectif entre professeurs devenus auteurs

et une communauté d'éditeurs chevronnés, ces ressources sont reconnues à la fois pour leur **qualité pédagogique** et leur **flexibilité d'usage.**

Nous sommes fiers d'être à vos côtés pour que vous trouviez chaque jour le chemin le plus adapté pour transmettre le savoir.

NOTRE IDÉE DE L'ENSEIGNEMENT : LA VÔTRE.

L'ESSENTIEL

> Au niveau de l'équateur, les vents de la stratosphère changent de direction tous les 14 mois environ.

> Ce phénomène n'est pas lié au mouvement de la Terre. Il serait dû aux orages tropicaux qui produisent des turbulences chaotiques et aléatoires dans l'atmosphère.

> Pour mieux comprendre ces oscillations, dites quasi biennales, les auteurs ont mis au point une simulation qui reproduit leur comportement dans un système simplifié.

> Ce phénomène serait aussi présent dans certaines étoiles ou à l'intérieur des planètes ayant un noyau liquide.

LES AUTEURS



LOUIS-ALEXANDRE COUSTON
postdoctorant
à l'Irphé,
à Marseille



BENJAMIN FAVIER
chargé
de recherche
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille



MICHAEL LE BARS
directeur
de recherche
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille

Vents stratosphériques Un cycle né du chaos

Dans la stratosphère, la direction des vents équatoriaux s'inverse tous les 14 mois environ. Ce cycle, qui influe sur le climat, serait dû au caractère intermittent des tempêtes tropicales. Un ordre né du chaos, confirmé par des expériences et des simulations.



La stratosphère, entre 16 et 50 kilomètres d'altitude, est une couche atmosphérique peu agitée. Elle présente néanmoins une inversion périodique du sens des vents.

En 1883, le volcan indonésien Krakatoa est entré en éruption. La puissance de celle-ci a projeté des débris dans l'atmosphère jusqu'à 30 kilomètres d'altitude. Les météorologues de l'époque ont constaté que ces poussières ont fait le tour de la Terre en deux semaines, d'est en ouest en suivant l'équateur. Ils ont ainsi découvert l'existence de vents puissants dans la stratosphère, soufflant à plus de 100 kilomètres par heure. En 1908, le météorologue allemand Arthur Berson a étudié à son tour ces vents équatoriaux grâce à des ballons. Il a eu la surprise de noter que les vents soufflaient dans le sens contraire, d'ouest en est!

Des observations et des relevés plus réguliers ont permis de résoudre cette apparente contradiction. La stratosphère est le siège d'un phénomène périodique, nommé oscillation quasi biennale. Le mouvement des masses d'air

de la stratosphère au niveau de l'équateur s'inverse tous les 14 mois et constitue un cycle complet de 28 mois, soit un peu plus de 2 ans.

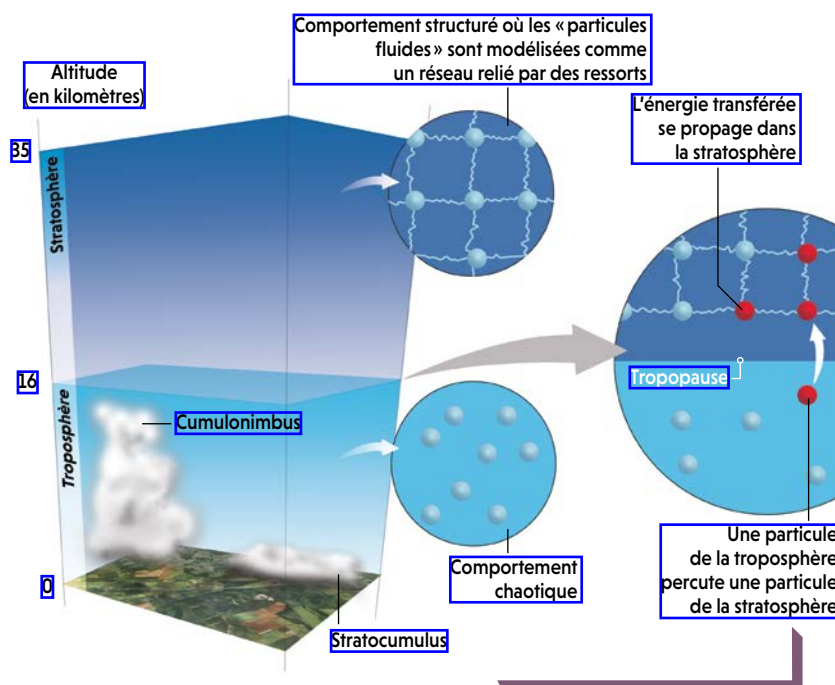
Quelle est l'origine de ce phénomène, qui est sans lien avec les cycles météorologiques annuels associés à la révolution de la Terre autour du Soleil? Le cycle atypique émergerait de processus chaotiques actifs dans l'atmosphère à plus basse altitude, en l'occurrence les tempêtes tropicales. Celles-ci provoquent des perturbations, nommées ondes atmosphériques, qui se propagent tout autour de la planète. Au-dessus de l'équateur, ces ondes forceraient l'air situé entre 16 et 35 kilomètres d'altitude à se déplacer tantôt vers l'ouest, tantôt vers l'est.

Cette explication n'est pas sans rappeler la métaphore bien connue pour illustrer le chaos déterministe où un battement d'ailes de papillon engendre un ouragan à l'autre bout du monde: de petites causes peuvent avoir de grandes conséquences.

Pour confirmer ce lien entre les tempêtes et l'oscillation quasi biennale, il était nécessaire de modéliser le phénomène. Notre équipe a ainsi développé une simulation qui reproduit ce cycle. L'enjeu est de pouvoir étudier dans les moindres détails ces oscillations et de mieux comprendre leur influence sur la dynamique de l'atmosphère terrestre dans son ensemble.

DE LA TROPOSPHÈRE VERS LA STRATOSPHERE

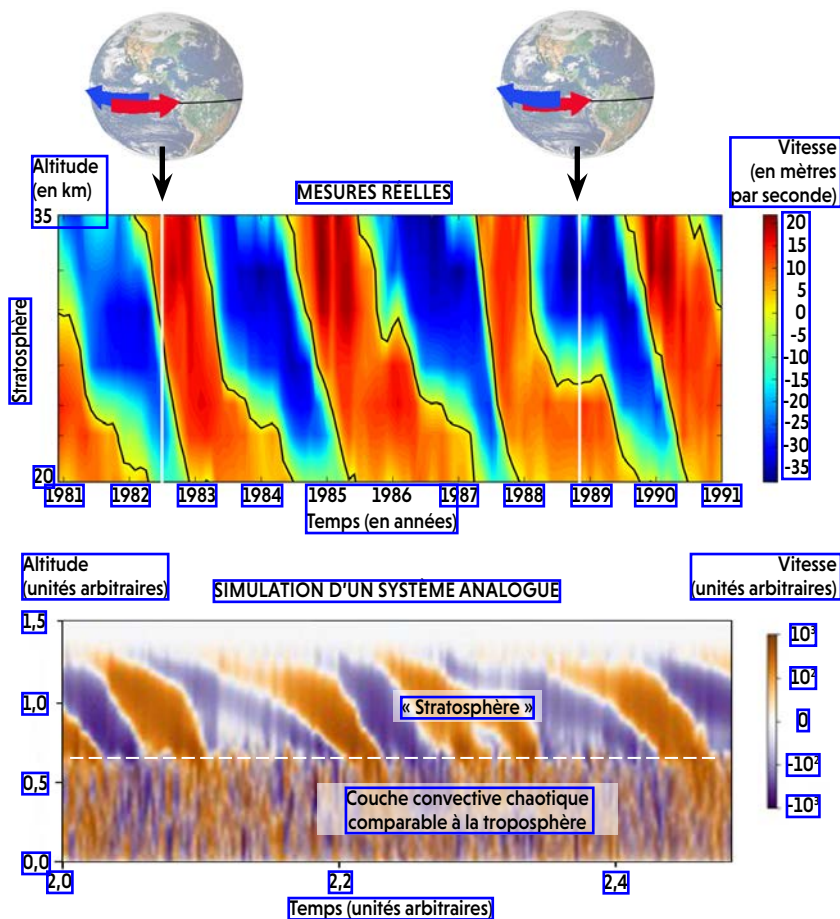
La partie basse de l'atmosphère est organisée en deux couches: la troposphère s'étend du sol jusqu'à la tropopause, à environ 16 kilomètres d'altitude, et la stratosphère commence à la tropopause et se termine à environ 50 kilomètres d'altitude. Dans la troposphère, où la température diminue avec l'altitude, l'air est moins dense en bas, ce qui rend cette couche instable, agitée et le siège des principales activités météorologiques. Les « particules fluides » d'air (en bleu) s'y déplacent de façon chaotique. À l'inverse, dans la stratosphère, la température augmente avec l'altitude et l'air s'organise en couches horizontales relativement stables. Les particules d'air y sont modélisées comme un réseau relié par des ressorts. Lorsqu'une particule d'air de la troposphère (en rouge) percute la tropopause, elle cède une partie de son énergie à la stratosphère. La perturbation se propage de proche en proche sous la forme d'ondes, qui fournissent l'énergie nécessaire au développement de l'oscillation quasi biennale.



UNE SURPRENANTE INVERSION DE DIRECTION

Indépendamment de leur changement périodique de direction, les vents stratosphériques étaient déjà une surprise pour les météorologues, qui avaient longtemps pensé que la stratosphère était plutôt calme, comparée à la troposphère. L'atmosphère se divise en couches aux caractéristiques très différentes (voir l'encadré ci-contre). La troposphère s'étend du sol jusqu'à la tropopause, à environ 16 kilomètres d'altitude. Elle est le siège de la plupart des phénomènes météorologiques, dont des tempêtes et des vents violents. La stratosphère, située entre la tropopause et la stratopause, à environ 50 kilomètres d'altitude, doit son nom au fait que l'air y est stratifié en densité (qui diminue avec l'altitude).

Les gaz à effet de serre, tel l'ozone, présents surtout dans les couches supérieures de la stratosphère, y captent l'énergie du rayonnement ultraviolet venant de l'espace et la redistribuent. En conséquence, la température de la stratosphère augmente avec l'altitude (à l'inverse de ce qu'on observe dans la troposphère) et la densité diminue. Cette répartition de densité stabilise les mouvements verticaux de masses d'air au sein de la stratosphère: chaque petit volume d'air déplacé verticalement tend à revenir à sa place sous l'action de la gravité. Du fait de



Dans la stratosphère, au-dessus de l'équateur, la direction des vents est-ouest suit un cycle de 28 mois. Les observations (en haut) sur une période de dix ans (1981-1991) mettent en évidence le phénomène. La simulation numérique (en bas) d'un système analogue et simplifié de l'atmosphère, étudié par les auteurs, met en évidence un phénomène cyclique similaire.

L'apparente quiétude de la stratosphère, les chercheurs ont longtemps négligé son influence sur la météorologie mondiale.

Les travaux d'Arthur Berson ont montré que la dynamique de la stratosphère était plus riche qu'on ne le pensait. En 1961, l'Américain Richard Reed et l'Anglais Robert Ebdon ont confirmé l'existence des oscillations quasi biennales et ont décrit avec précision ces vents stratosphériques persistant au-dessus des tropiques. Ils ont montré que l'air stratosphérique se déplace en une multitude de couches horizontales dont la vitesse varie continuellement avec l'altitude et dont la direction de propagation (vers l'est ou l'ouest) change au cours du temps (voir la figure ci-dessus). Les observations ont montré que c'est la couche la plus élevée, vers 35 kilomètres d'altitude (plus haut, les vents s'atténuent très vite), qui est la première à changer de sens. Par effet domino, toutes celles en dessous finissent aussi par changer de sens. Une oscillation complète des vents entre 16 et 35 kilomètres d'altitude dure environ 28 mois.

Les vents de l'oscillation quasi biennale circulent en suivant l'équateur dans une bande assez étroite qui couvre toute la ceinture tropicale. Aux latitudes supérieures à 12 degrés au nord et au sud, la force de Coriolis, due à la rotation de la Terre sur elle-même, atténue cet effet. Néanmoins, il a été montré que

l'oscillation quasi biennale influe indirectement sur l'ensemble de la météo mondiale. Elle module certains phénomènes atmosphériques aux hautes latitudes, tels que l'oscillation nord-Atlantique et les vortex polaires. Elle a aussi un rôle dans la dynamique de la couche d'ozone et dans les cycles de la mousson. Du fait de sa grande régularité, elle est considérée comme une constante stabilisatrice de l'atmosphère dans les modèles météorologiques. Cependant, il a fallu attendre les années 2000 pour qu'apparaissent les premières tentatives d'inclusion de ce phénomène dans les modèles climatiques.

Mais quelle est son origine? Au cours des années 1950, les météorologues ont d'abord considéré les effets des marées, des changements de température des sols et des océans ou encore de l'activité fluctuante du Soleil sur les vents stratosphériques. Ces pistes se sont révélées infructueuses: aucune des variabilités considérées n'engendrait l'oscillation ou n'expliquait son cycle de 28 mois. L'idée d'une force agissant à grande échelle a alors été abandonnée.

La situation s'est progressivement débloquée vers la fin des années 1960 quand de nouvelles observations et des modèles théoriques ont suggéré que la stratosphère, bien que stratifiée et stable, est en fait le siège de nombreux mouvements. Ces derniers ne sont pas turbulents: il s'agit d'ondes atmosphériques, un peu comme une version tridimensionnelle des vagues à la surface des océans. Ces ondes se propagent horizontalement (par exemple d'est en ouest), mais aussi verticalement. Les turbulences animant la troposphère (dus aux orages, tempêtes, etc.) sont une source importante d'ondes atmosphériques qui se propagent dans la stratosphère.

Le paquet d'ondes associé à une seule tempête a peu d'effets sur la dynamique stratosphérique. Mais si l'on considère l'ensemble des paquets d'ondes produits par la totalité des tempêtes, ainsi que ceux engendrés par d'autres mécanismes dont la rotation de la Terre, on obtient alors une source d'énergie suffisante pour déclencher et amplifier les vents stratosphériques. Restait à expliquer l'inversion régulière de la direction du vent.

LE RÔLE CRUCIAL DES ONDES ATMOSPHÉRIQUES

À la fin des années 1960, les Américains Richard Lindzen et James Holton ont proposé un modèle physique simple faisant le lien entre les ondes atmosphériques et l'oscillation quasi biennale. L'idée centrale est que les ondes atmosphériques ne font pas que traverser la stratosphère: elles transfèrent aussi une part de leur énergie au profit d'un déplacement moyen des masses d'air stratosphériques. Le phénomène est similaire au rôle joué par les vagues océaniques dans la migration des déchets et algues vers les

Les ondes au-dessus des tropiques se propageant vers l'est poussent l'air stratosphérique vers l'est, tandis que les ondes allant vers l'ouest poussent l'air stratosphérique vers l'ouest. On s'attend à ce que les effets se compensent et s'équilibrent du fait que, en moyenne, autant d'ondes vont vers l'est que vers l'ouest.

Mais cet équilibre est instable. Dès qu'un infime vent stratosphérique naît, les ondes allant dans la même direction que celui-ci cèdent leur énergie bien plus efficacement que les ondes allant en sens contraire, et le vent initial s'amplifie. Ainsi, si l'on part de deux paquets d'ondes de sens contraires, celui qui est dans le même sens que le vent renforce ce dernier en lui donnant son énergie, tandis que celui qui est dans le sens contraire continue de se propager dans des couches stratosphériques plus élevées où il crée un vent de sens contraire.

Les ondes transfèrent ainsi leur énergie au vent et s'amortissent d'autant. Quand on applique cet effet à un profil de vent variant selon l'altitude, on note que la plus grande partie de l'énergie est transférée avant d'atteindre la couche de la stratosphère où le vent est le plus rapide. Dès lors, le maximum relatif des vitesses de vent descend progressivement vers la tropopause. Et en arrivant à la frontière entre la troposphère et la stratosphère, le vent s'amortit du fait des turbulences troposphériques et finit par disparaître.

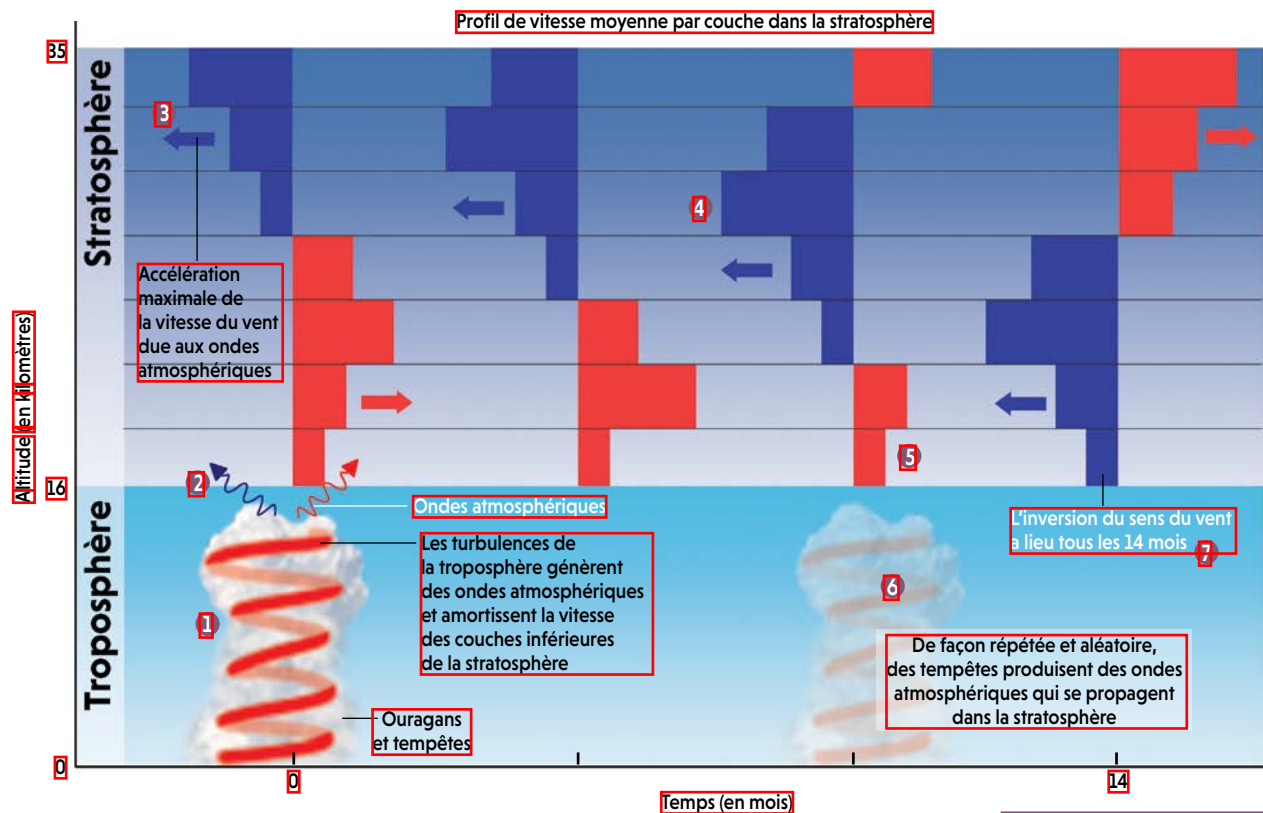
Si l'on combine l'effet d'amplification et d'amortissement près de la tropopause, on obtient une inversion cyclique de la direction des vents dans les différentes couches de la stratosphère (voir l'encadré ci-dessous).

En 1978, près de dix ans après les premières formulations théoriques, Alan Plumb et Angus

LA DYNAMIQUE DES OSCILLATIONS QUASI BIENNALES

Les tempêtes dans la troposphère (1) constituent le moteur des oscillations quasi biennales de la stratosphère. Elles produisent des turbulences qui engendrent des ondes atmosphériques se propageant vers le haut (2) dans toutes les directions (ici, en bleu vers la gauche et en rouge vers la droite). Ces ondes transfèrent leur énergie aux vents des couches horizontales de la stratosphère, qui gagnent en vitesse. Le transfert est d'autant plus efficace que les ondes se propagent dans la même direction que les vents (une onde « bleue » transfère son énergie à des vents « bleus », une onde « rouge »

donne son énergie à un vent « rouge »). Comme les ondes perdent leur énergie à mesure qu'elles gagnent en altitude, l'accélération du vent tend à être maximale dans une couche plus basse que celle où le vent est le plus fort (3). Cela donne l'impression que la couche de vitesse maximale descend au cours du temps (4). Par ailleurs, les turbulences de la troposphère amortissent les vents de la stratosphère en contact avec la tropopause (5). Malgré le caractère intermittent des tempêtes (6), l'ensemble de ces processus conduit à une inversion quasi régulière du sens des vents tous les 14 mois environ (7).



COMMENT L'ORDRE ÉMERGE DANS LES SYSTÈMES MULTIÉCHELLES

Il est assez aisé de prédire quel sera l'écoulement dans votre tasse de café lorsque vous y tournez une cuillère afin de mélanger le sucre, car tout se passe à la même échelle spatiale, de l'ordre du centimètre. Il en est de même de certains phénomènes atmosphériques se développant sur plusieurs milliers de kilomètres. C'est le cas de la « cellule de Hadley », proposée par le météorologue anglais George Hadley en 1735 : du fait d'un

ensoleillement plus intense à l'équateur qu'aux pôles, la différence de température entraîne un écoulement d'air à très grande échelle. Tous les effets impliqués dans le phénomène agissent à des échelles spatiales similaires, de l'ordre de la taille de la planète. C'est pourquoi la cellule de Hadley et la tasse sont simples à modéliser.

Mais ce n'est pas toujours

le cas. Il est par exemple beaucoup plus difficile de prédire quel sera l'écoulement global dans une piscine olympique si 100 personnes se mettent à nager chacune à son rythme. Chaque nageur introduit une part d'aléatoire et il existe une différence d'échelle entre les mouvements engendrés par ses jambes et ses bras, de l'ordre du centimètre ou du mètre, et la taille de la piscine.

De même, une partie de la circulation atmosphérique

(ou océanique pour les océans, stellaire pour les étoiles, etc.) à grande échelle doit son origine à la présence d'une multitude de petits mouvements rapides et aléatoires (vagues, tourbillons, turbulences) souvent très difficiles, voire impossibles, à observer directement.

La physique qui décrit l'action collective de ces petits mouvements permettant d'engendrer un écoulement à l'échelle d'une planète ou d'une étoile est souvent complexe. En général, l'action collective de ces petites fluctuations ne permet pas de faire émerger un mouvement d'ensemble si elles sont complètement désordonnées.

Il faut qu'un mécanisme mette de l'ordre dans tout ce capharnaüm ! Pour l'oscillation quasi biennale, les perturbations sont les ondes qui se déplacent dans la

stratosphère, et le métronome du désordre est le vent global lui-même, qui fait le tour de la planète au niveau de l'équateur. Il suffit que ce vent global émerge, aussi faible soit-il, pour que les perturbations initialement aléatoires s'organisent et cèdent leur énergie au vent global et l'amplifient.

Le problème est complexe : il est très difficile de comprendre et prédire la physique du cercle vertueux permettant aux grandes échelles de se nourrir des petites échelles. Cela fait systématiquement appel à des interactions non linéaires impliquant des échelles spatiales allant du mètre jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. C'est pourtant un mécanisme fondamental qui s'applique à de nombreux systèmes, de l'atmosphère terrestre jusqu'à l'intérieur des étoiles.

McEwan, de l'université de Melbourne, en Australie, ont reproduit en laboratoire le mécanisme d'oscillation quasi biennale. L'expérience, revue et améliorée en 2018 par Benoît Semin, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues, utilisait une cuve cylindrique remplie d'eau, très salée en bas et de moins en moins salée vers le haut pour reproduire la stratification stable de la stratosphère. Une membrane flexible collée en bas de la cuve vibrait pour produire des ondes similaires aux ondes atmosphériques. Ce dispositif de taille décimétrique reproduisait « à l'échelle » les ingrédients principaux du modèle théorique de l'oscillation quasi biennale. Les paquets d'ondes étaient émis en sens opposés avec une période typique de 15 à 30 secondes (correspondant à quelques dizaines de minutes dans la « vraie » stratosphère). Ils renforçaient

chacun un écoulement dans le sens correspondant, dont le renversement s'effectuait sur une durée beaucoup plus longue, à l'échelle d'une heure environ (correspondant aux 28 mois de la « vraie » oscillation quasi biennale).

Cette expérience a confirmé que le modèle théorique décrivait correctement le processus à l'origine de l'oscillation quasi biennale. Cependant, les chercheurs sont loin de pouvoir prédire avec précision quand des vents stratosphériques vont s'inverser à l'horizon de plusieurs années, voire des décennies. En effet, à quelques exceptions près, les modèles théoriques négligent ce qui constitue la richesse et la complexité de l'oscillation quasi biennale : le fait que les ondes sont produites grâce à un processus turbulent et intermittent, celui des tempêtes. La régularité de l'oscillation quasi biennale n'est pas parfaitement métronomique et des anomalies aujourd'hui imprévisibles se cachent derrière l'intermittence des tempêtes.

L'oscillation quasi biennale influe sur les moussons et la couche d'ozone

LE CHAOS DES TEMPÊTES

L'oscillation quasi biennale illustre parfaitement la complexité des interactions qui régissent la dynamique de l'atmosphère terrestre. De façon plus générale, elle appartient à la classe de phénomènes physiques dits multi-échelles, dans lesquels une organisation globale du système se met en place spontanément dans un écoulement turbulent, donc désorganisé et très fluctuant jusqu'aux plus petites échelles d'espace et de temps (voir l'encadré ci-dessus). Le cycle de 11 ans du Soleil, entre des périodes de forte et de faible activité

▷ magnétique à sa surface, est un autre exemple de phénomène multiéchelles. Il s'agit d'une oscillation assez régulière émergeant de la dynamique complexe et rapide de sa zone convective. Les bandes de Jupiter constituent un autre exemple frappant d'organisation à grande échelle au sein d'un écoulement turbulent : l'énergie est injectée à petite échelle par les tempêtes atmosphériques et les colonnes convectives du manteau liquide. De tels systèmes constituent un défi pour la compréhension physique et la modélisation, puisqu'il faut appréhender le système dans son ensemble, depuis ses plus petites composantes jusqu'aux plus grandes, et depuis ses fluctuations les plus rapides jusqu'aux variations les plus lentes.

Dans le cas de l'oscillation quasi biennale, ce sont les tempêtes tropicales, d'une durée de quelques heures à quelques jours et s'étendant sur quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres, qui émettent des ondes dans la stratosphère avec des périodes allant de dix minutes à quelques heures, et des tailles de quelques

kilomètres à quelques centaines de kilomètres. Ensuite, ces ondes créent spontanément un écoulement global est-ouest de toute la bande équatoriale de la stratosphère, donc sur plus de 40000 kilomètres, qui s'inverse régulièrement.

Un point important est que les modèles globaux de circulation atmosphérique (GCM pour *Global Circulation Models*), utilisés pour étudier le climat, ne décrivent pas avec précision les tempêtes et ondes, « détails » trop petits et trop rapides pour leurs capacités de résolution (voir l'encadré ci-dessous). De façon imagée, cela reviendrait à essayer de modéliser le mouvement d'un enfant sur une balançoire en suivant l'action de chacune des cellules musculaires ! Ce degré de détail n'est pas nécessaire pour comprendre le balancement : il suffit de modéliser l'action globale du corps par une force agissant sur la balançoire. De même, dans les GCM, les effets des tempêtes et des ondes sont paramétrisés, c'est-à-dire non pas complètement modélisés, mais introduits sous forme de forçages avec des paramètres *ad hoc*, dont les

L'ÉVOLUTION DU CLIMAT ET LES PROBLÈMES MULTIÉCHELLES

Malgré de nombreuses avancées techniques, prévoir la météo pour les jours qui viennent reste une tâche ardue. Prédire quel sera le climat de la Terre pour les cent prochaines années l'est encore plus.

Pour décrire et déterminer l'évolution du climat, il faut étudier un modèle aux équations très complexes, dont la résolution n'est possible que par des calculs numériques.

Dans de tels calculs, l'atmosphère de la Terre (ainsi que l'océan pour les modèles les plus évolués) est divisée en petits volumes centrés autour de points interconnectés (on parle de discrétisation, voir la figure ci-contre) qui contiennent chacun des informations sur la température, l'humidité, la vitesse du vent, etc. Plus les volumes sont petits, plus le modèle sera précis et prédictif. Même problème pour l'évolution temporelle

du système : le temps est découpé en courts intervalles qui séparent deux états successifs du modèle. Plus ce pas de temps est petit, meilleur sera le modèle. Il n'est cependant pas possible d'utiliser un nombre arbitrairement grand de points d'espace et de temps pour avoir le résultat le plus précis possible, car cela exigerait de trop importantes ressources de calcul.

Même en utilisant les meilleures infrastructures de calcul numérique, qui utilisent des milliers de processeurs simultanément, les modèles les plus performants sont limités à un point de calcul tous les 100 kilomètres environ selon la direction horizontale, et tous les kilomètres en moyenne selon la verticale. L'état du système est évalué quelques fois par jour au mieux, ce afin de pouvoir considérer plusieurs dizaines, voire centaines, d'années. Il est donc impossible dans ces simulations de prédire des variations de température ou de vitesse à des échelles inférieures à la centaine de kilomètres, ou sur des temps inférieurs à l'heure.

Dès lors, les petits mouvements rapides de l'air ne sont pas simulés directement, alors qu'ils influent sur la circulation atmosphérique à grande échelle. Ils sont donc pris en compte dans les

équations par des termes qui miment leur action, en apportant par exemple une accélération virtuelle aux vents aux grandes échelles, qui sont, eux, explicitement résolus par le modèle.

Savoir quelle accélération ajouter correspond au travail de « paramétrisation ». Celui-ci est essentiel pour la prédiction climatique, mais aussi dans d'autres domaines de la physique où l'on modélise l'effet d'une multitude de petites structures rapides sur l'évolution d'une grande structure plus lente (on parle

alors de problème « multiéchelles »). Une bonne paramétrisation nécessite une connaissance complète de la physique sous-jacente, d'où l'intérêt des modèles théoriques, des expériences de laboratoire, et des simulations plus localisées et plus idéalisées que les modèles climatiques complets. Les oscillations quasi biennales offrent un exemple de problème multiéchelles dans l'atmosphère dont la compréhension est cruciale pour améliorer les modèles climatiques.



Dans les simulations numériques du climat, on discrétise l'atmosphère, qui est ainsi découpée en petites cellules où les variables climatiques (température, pression, etc.) sont supposées uniformes. On calcule ensuite l'évolution temporelle de ces grandeurs, régie par les équations du modèle utilisé.

valeurs sont ajustées pour reproduire correctement les observations et les données actuelles.

Le problème est que, contrairement aux mouvements du corps sur la balançoire, qui sont *a priori* assez réguliers, puisque produits dans le but explicite de se balancer, les tempêtes sont chaotiques. Leur caractère fluctuant n'est pris en compte que de façon simplifiée dans les GCM, et ces approximations influent beaucoup sur la précision des modèles et sur leur caractère prédictif.

Ainsi, aucun GCM n'avait prédit la perturbation nette du cycle de l'oscillation quasi biennale enregistrée en 2016 et observée par l'équipe de Scott Osprey, de l'université d'Oxford. Première déviation dans les cycles des oscillations quasi biennales depuis plus de 60 ans, elle serait peut-être liée au réchauffement climatique et donc à une irrégularité du forçage des ondes.

L'OSCILLATION QUASI BIENNALE SIMULÉE

Au regard de l'influence de l'oscillation quasi biennale sur la météorologie planétaire et l'apparition de cette perturbation non anticipée, il est nécessaire de poursuivre notre étude du phénomène pour mieux comprendre sa variabilité. À l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé), à Marseille, notre équipe a réalisé une première étape en développant des simulations numériques de longue durée d'un système complet. Celui-ci s'organise spontanément en une couche convective turbulente en contact avec une couche stratifiée, et engendre des ondes internes de gravité dans cette dernière. Notre modèle s'appuie sur une description physique la plus généraliste possible d'une configuration simple: une boîte rectangulaire, chauffée par le bas et refroidie par le haut, avec des mouvements fluides décrits par des équations génériques de la mécanique des fluides, en l'occurrence les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible.

L'originalité de notre système provient d'un coefficient de dilatation thermique non constant, c'est-à-dire d'une relation non monotone entre les variations de masse volumique du fluide et les variations de sa température. Dans un modèle classique, la densité d'un fluide diminue lorsque sa température augmente, et donc ce fluide chauffé par le bas (respectivement refroidi par le haut) se met à monter (respectivement à descendre): le fluide dans son intégralité se met à produire des mouvements de convection sur toute sa hauteur. Dans notre modèle, nous avons considéré qu'au-dessous d'une température de référence, cette propriété s'inverse, et donc que le fluide est de moins en moins dense quand la température diminue. Cela peut paraître surprenant, mais c'est le cas de l'eau entre 0 °C et 4 °C (ce qui explique pourquoi le fond des lacs est

souvent à 4 °C)! En conséquence, en dessous de cette température de référence, notre fluide chauffé par en bas et refroidi par en haut est stratifié, comme la stratosphère. En poursuivant nos simulations sur des temps suffisamment longs, un écoulement moyen s'inversant lentement apparaît alors spontanément, au-dessus de la couche convective complètement chaotique (voir la figure page 29).

Pour l'instant, du fait des limites dans la puissance de calcul de nos ordinateurs, notre modèle est limité à deux dimensions et sa description physique simple n'inclut pas les complexités d'une atmosphère réelle. Cependant, il vient compléter les modèles théoriques, expérimentaux et de type GCM décrits précédemment, en relevant pour la première fois le défi d'appréhender l'ensemble des échelles spatio-temporelles et toutes les interactions dans un système complet. Il offre ainsi la possibilité de comprendre la physique globale des écoulements de type oscillation quasi biennale (QBO).

La simplicité de notre modèle présente aussi l'avantage de démontrer le caractère générique du mécanisme menant des fluctuations turbulentes aux petites échelles à un écoulement organisé à grande échelle: ainsi, l'existence d'une couche convective adjacente à une couche stratifiée stable semble suffire à l'apparition d'une QBO! Or une telle organisation à deux couches existe *a priori* dans de nombreuses atmosphères planétaires, et en particulier dans les géantes gazeuses. Et de fait, des renversements de type QBO ont aussi été observés sur Jupiter avec une période de 4 ans et sur Saturne avec une période de 15 ans. Même si la source de ces écoulements reste hors d'atteinte des observations actuelles, tout laisse à croire qu'il s'agit là aussi d'ondes excitées par la convection.

DE LA TERRE AUX ÉTOILES

L'intérieur des étoiles est aussi constitué d'une zone convective au-dessus (pour les étoiles de type solaire) ou au-dessous (pour les étoiles plus massives) d'une zone radiative, stratifiée et stable. Plus spéculatif: le noyau en fer liquide de la Terre pourrait lui aussi comporter une couche stratifiée stable, au-dessus de la couche convective engendrant le champ magnétique. La présence d'ondes a déjà été détectée dans les fluctuations du champ magnétique, et nul doute qu'une QBO dans le noyau devrait également avoir une signature observable.

Notre modèle générique constitue un outil unique qui montre que des écoulements de type QBO peuvent intervenir dans de multiples contextes planétaires et stellaires. S'il est encore extrêmement simplifié aujourd'hui, il permettra à terme d'en étudier les caractéristiques, les perturbations et les conséquences spécifiques aux contextes atmosphériques, stellaires et planétaires. ■

BIBLIOGRAPHIE

L.-A. Coustou et al., Order out of chaos : slowly reversing mean flows emerge from turbulently generated internal waves, Phys. Rev. Lett., vol. 120, 244505, 2018.

B. Semin et al., Nonlinear saturation of the large scale flow in a laboratory model of the quasibiennial oscillation, Phys. Rev. Lett., vol. 121, 134502, 2018.

S. Osprey et al., An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillation, Science, vol. 353, pp. 1424-1427, 2016.

R. A. Plum et A. D. McEwan, The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid : a laboratory analogue of the quasi-biennial oscillation, J. Atmospheric Sci., vol. 35(10), pp. 1827-1839, 1978.

R. S. Lindzen et J. R. Holton, A theory of the quasi-biennial oscillation, J. Atmos. Sci., vol. 25, pp. 1095-1107, 1968.

L'ESSENTIEL

> Certaines cytokines, des molécules libérées par le corps en cas d'inflammation (par exemple à la suite d'une infection), sont aussi produites dans le cerveau, où elles modifient son fonctionnement.

> Elles déclenchent des cascades moléculaires qui aboutissent à une baisse des neurotransmetteurs,

notamment de la sérotonine, au rôle clé dans l'humeur, et à la production de molécules neurotoxiques.

> Ainsi, des maladies chroniques associées à une inflammation, comme certains troubles intestinaux, l'obésité, le diabète ou des maladies auto-immunes, favoriseraient la survenue de dépressions.

LES AUTEURES



LUCILE CAPURON
directrice de recherche à l'Inra au sein de l'unité Nutrineuro (Inra), à l'université de Bordeaux



NATHALIE CASTANON
chargée de recherche à l'Inra dans le même laboratoire

L'origine inflammatoire de la dépression

Lorsqu'une inflammation s'installe dans l'organisme, elle perturbe le fonctionnement du cerveau au point parfois de déclencher une dépression. On commence à comprendre par quels mécanismes.

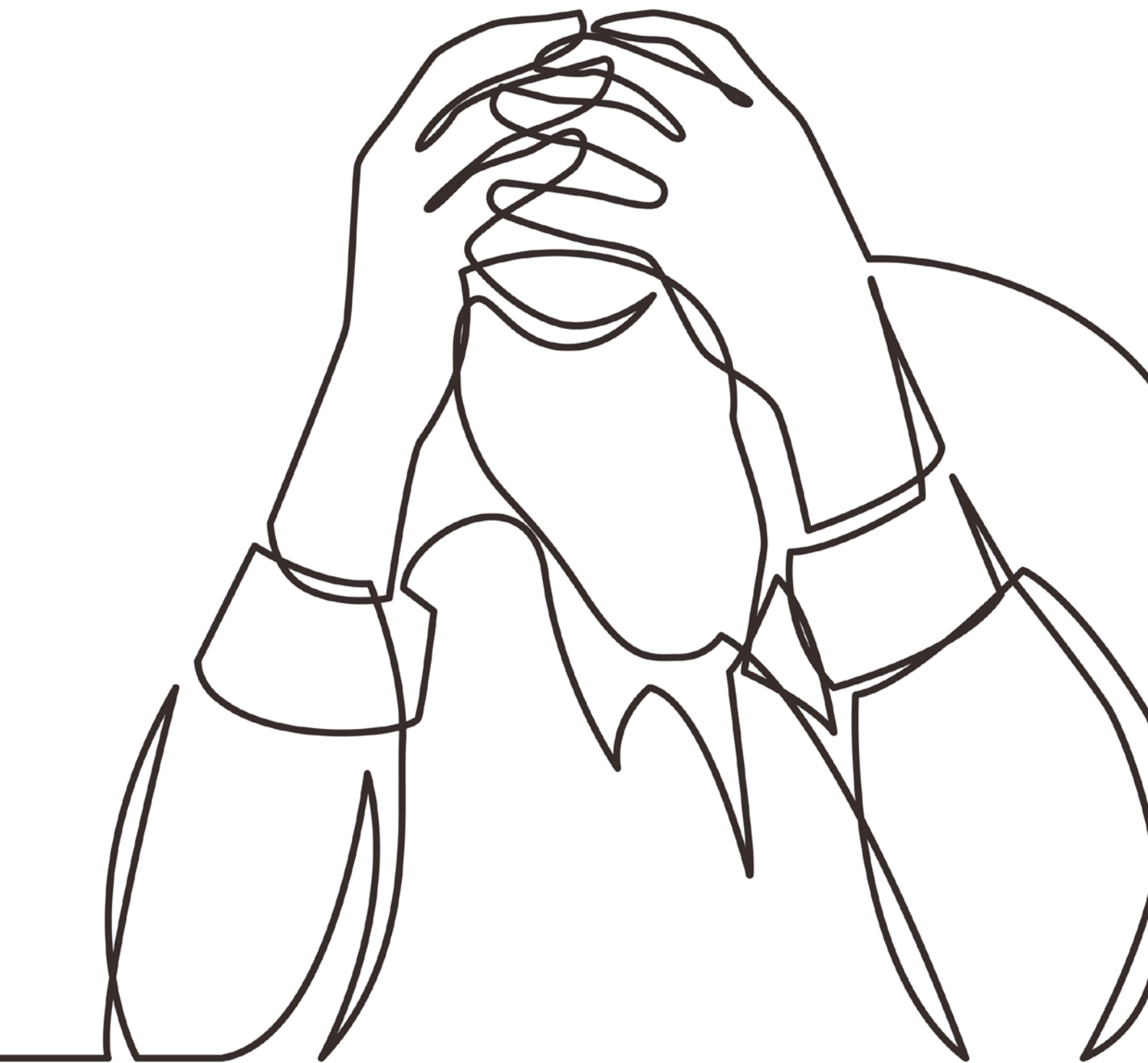
La dépression est un problème majeur de santé publique. Cette maladie se caractérise par un ensemble de symptômes persistants (tristesse, rumination, perte d'intérêt ou de plaisir pour les choses habituellement agréables, sentiment de culpabilité ou dévalorisation de soi, problèmes de mémoire et de concentration...), associés à un certain nombre de symptômes neurovégétatifs (troubles du sommeil et de l'appétit, fatigue, diminution du tonus et de la motivation...). Tous ces symptômes ont un retentissement profond sur la vie quotidienne et le bien-être des personnes affectées.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), cette maladie touche plus de 300 millions d'individus dans le monde et représente une des premières causes d'incapacité. À ce titre, la dépression fait partie des pathologies prioritaires visées par le Programme d'action *Comblant les lacunes en santé mentale*, lancé par l'OMS dès 2008. Cela est d'autant plus important que d'autres affections chroniques très courantes, comme les maladies métaboliques

(obésité, diabète de type 2, syndrome métabolique), auto-immunes ou cardiovasculaires, sont associées à un risque accru de dépression. À l'inverse, la présence de symptômes de dépression contribue d'ailleurs souvent à augmenter le risque de complications médicales ultérieures, favorisant ainsi la mise en place d'un cercle vicieux aux conséquences très délétères pour la santé des patients. Plus grave encore, malgré les progrès thérapeutiques réalisés au cours des dernières décennies, au moins un tiers des patients déprimés ne répondent pas aux traitements antidépresseurs standards. Il est donc crucial de mieux comprendre les bases physiopathologiques de la dépression de façon à en améliorer la prise en charge et le traitement.

Pourquoi devient-on dépressif? Différents facteurs entrent en jeu, qui peuvent être liés à des modifications survenant dans l'environnement de l'individu (événements ou stress répétés, par exemple), ou à sa personnalité, ses habitudes de vie, ses gènes ou certaines caractéristiques biologiques. Mais récemment, des recherches ont suggéré que notre système immunitaire serait aussi en partie responsable.





En effet, qu'elles soient métaboliques, auto-immunes ou cardiovasculaires, les pathologies chroniques associées à un risque accru de dépression sont le plus souvent des maladies à composante inflammatoire. Or il a été montré que l'activation de processus inflammatoires périphériques (c'est-à-dire hors du système nerveux central) perturbe le fonctionnement du cerveau et altère les systèmes neuronaux impliqués dans la régulation de l'humeur. Ces altérations facilitent donc l'instauration d'un terrain biologique particulièrement propice à l'apparition de symptômes de dépression.

Les mécanismes sous-tendant ces altérations commencent à être bien connus et font notamment intervenir un véritable réseau de communication entre le système immunitaire et le cerveau. Ce réseau repose sur des molécules inflammatoires capables d'altérer les concentrations de certains neurotransmetteurs cérébraux (les molécules qui assurent la communication entre les neurones) essentiels au maintien de l'humeur, comme la sérotonine.

DES CYTOKINES JUSQU'AU CERVEAU

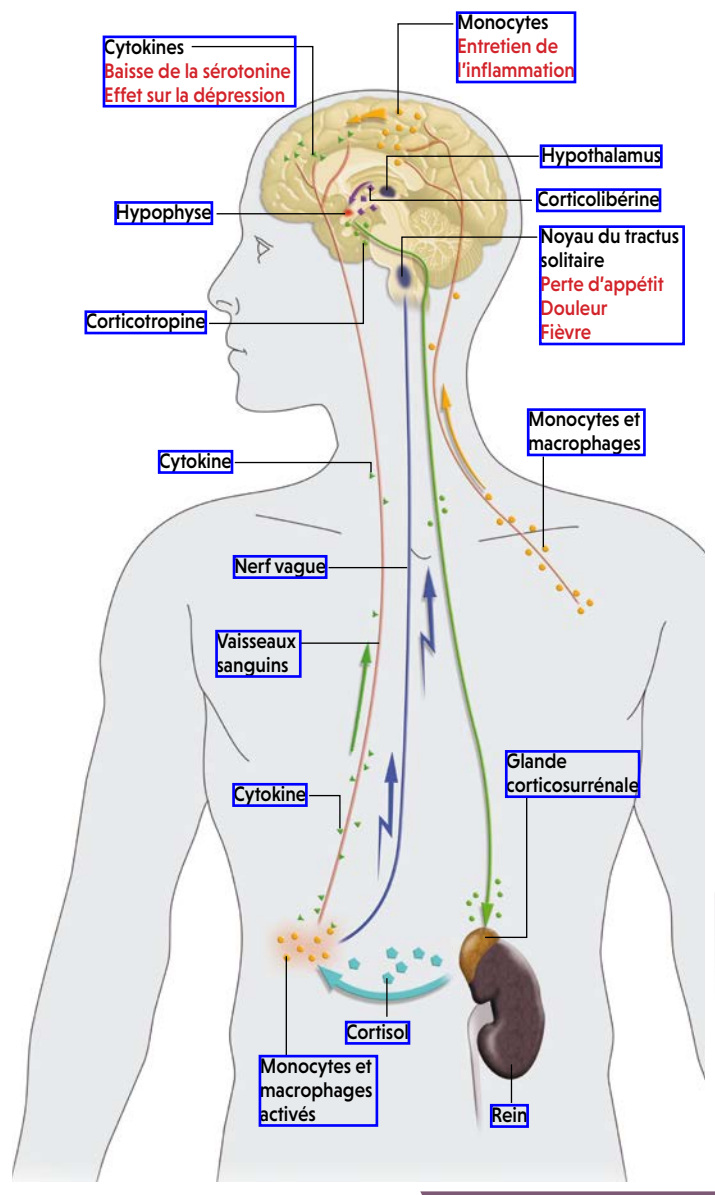
En cas d'infection par des agents pathogènes (bactéries, virus), deux types de réactions immunitaires se mettent en place : l'immunité innée, rapide, mais peu spécifique de l'agent infectieux, et l'immunité adaptative, spécifique de celui-ci (par le biais d'anticorps), mais plus lente. L'immunité innée est considérée comme la première ligne de défense de l'organisme. Elle a trois composantes : une composante locale – la réponse inflammatoire –, une composante dite systémique, généralisée au corps entier, et une composante centrale limitée au cerveau.

À la suite d'une infection, tout commence par la réponse inflammatoire et son cortège de perturbations physiologiques locales, immédiates et transitoires : rougeur, tuméfaction avec chaleur, douleur... Les vaisseaux sanguins proches de l'infection deviennent plus perméables, permettant l'accumulation de cellules de l'immunité innée : monocytes, macrophages ou neutrophiles. Ces cellules finissent par détruire les agents pathogènes. Elles produisent aussi, temporairement, de fortes quantités de molécules inflammatoires, telles les cytokines, qui entretiennent et propagent les réactions immunitaires (voir l'encadré ci-contre).

Les infections ne causent qu'une partie des réactions inflammatoires. D'autres résultent de maladies inflammatoires (des troubles inflammatoires intestinaux, par exemple), de maladies auto-immunes (diabète de type I, polyarthrite rhumatoïde, lupus...) ou d'un dysfonctionnement des lymphocytes, des cellules clés de l'immunité. Dans ces cas aussi, des cytokines

INFLAMMATION ET CERVEAU

Lors d'une inflammation, le système immunitaire et le cerveau communiquent de plusieurs façons. L'activation du système immunitaire s'accompagne de la production, par les cellules immunes activées (des monocytes et des macrophages), de cytokines. Ces molécules agissent dans le cerveau via différentes voies. Certaines gagnent le cerveau, notamment par voie sanguine, et perturbent la libération des neurotransmetteurs, notamment la sérotonine, impliquée dans les troubles de l'humeur et la dépression. D'autres stimulent le nerf vague, qui déclenche divers symptômes tels que perte d'appétit, douleurs et fièvre. Enfin, dans le cerveau, les cytokines attirent des monocytes circulants qui entretiennent l'inflammation. En retour, le stress induit dans le cerveau influe sur l'activité du système immunitaire : l'hypothalamus libère une molécule, la corticolibérine, ce qui entraîne la production d'une hormone, la corticotropine, dans l'hypophyse. L'hormone gagne les glandes corticosurrénales où elle déclenche la libération d'une autre hormone, le cortisol. Cette dernière stimule la production de cytokines par les monocytes et les macrophages, entretenant le cycle inflammatoire.



sont produites, de même que dans certains troubles du métabolisme tels l'obésité ou le syndrome métabolique (la conjonction de plusieurs anomalies du métabolisme chez un même individu). Il arrive aussi que des cytokines soient libérées en situation de stress psychosocial.

Une fois l'inflammation installée, les cytokines ont de multiples effets. Localement, par exemple, elles favorisent la synthèse de molécules d'adhérence qui facilitent l'accumulation des cellules immunitaires sur le site de l'inflammation. Elles déclenchent aussi la perméabilisation des vaisseaux sanguins et la production de radicaux libres, des molécules instables qui, de proche en proche, déstabilisent les molécules alentour et aident ainsi à détruire les agents infectieux. L'action des cytokines ne reste cependant pas localisée. Elle retentit sur l'ensemble de l'organisme, y compris le cerveau.

LE COMPORTEMENT DE MALADIE

Dès lors, une série d'effets s'ensuivent : fièvre, changements du fonctionnement hormonal (notamment une augmentation des hormones corticoïdes impliquées dans la réponse au stress) et changements d'activité des systèmes de neurotransmission, à savoir les grandes voies neuronales dont la communication repose sur des molécules telles que la sérotonine, la dopamine, le GABA et le glutamate, qui jouent un rôle essentiel dans la régulation de l'humeur.

De telles modifications biologiques sont associées à des altérations du comportement :

on parle alors de « comportement de maladie ». En un mot : nous ne nous sentons pas bien, et nous nous comportons différemment lorsque nous sommes malades. Il s'agit de symptômes dits non spécifiques, que provoquent les cytokines : sensation de fatigue, perturbations du sommeil et de l'appétit, perte d'intérêt pour les activités habituelles et les contacts sociaux, difficultés de concentration et de mémorisation.

Longtemps considéré comme un effet secondaire ou une conséquence néfaste de la maladie, le comportement de maladie est en fait parfaitement régulé et revêt une valeur adaptative : il permet à l'organisme de lutter au mieux contre l'agent pathogène. Par exemple, réduire son activité, diminuer sa prise alimentaire, s'isoler et se reposer lorsqu'on est malade permet d'optimiser la réponse du système immunitaire à l'agent infectieux, en évitant notamment des pertes inutiles d'énergie et en réduisant le risque d'invasion de l'organisme par de nouveaux agents pathogènes.

Ces symptômes sont en général transitoires et d'intensité modérée. Mais si l'activation du système immunitaire est mal régulée ou devient chronique, ils peuvent s'intensifier et évoluer en troubles psychiques, telle la dépression. Humeur dépressive, perte d'intérêt et de plaisir, perte d'appétit, troubles du sommeil, ralentissement de l'activité motrice, perte d'énergie, altérations cognitives... De fait, les symptômes du comportement de maladie ressemblent fortement à ceux de la dépression, même si, par définition, ces derniers sont beaucoup plus intenses et

L'OBÉSITÉ FAVORISE-T-ELLE LA DÉPRESSION ?

Si les phénomènes inflammatoires persistants entraînent des dépressions, quelles sont les situations ou pathologies associées à de tels phénomènes ? L'une d'elles est l'obésité, caractérisée par une inflammation chronique dite de bas niveau (sans symptôme et avec des concentrations faibles de marqueurs de l'inflammation). C'est aussi le cas du diabète de type 2 ou du syndrome métabolique.

L'inflammation liée à l'obésité donne lieu à une production soutenue,

en particulier par le tissu adipeux, de cytokines et d'autres marqueurs inflammatoires à des concentrations relativement basses, mais significatives. En 2008, nous avons ainsi étudié les symptômes dépressifs de personnes saines ou atteintes de syndrome métabolique (excès de poids et altération de la tension artérielle et des concentrations de cholestérol et d'insuline), et avons observé que les personnes ayant un syndrome métabolique présentent plus de signes de dépression que les autres, et que ces symptômes sont associés à leur statut inflammatoire.

Le lien potentiel entre obésité, inflammation et dépression se précise lorsqu'on sait que la perte de poids chez le sujet obèse, notamment lorsque celle-ci fait suite à un acte chirurgical, s'accompagne d'une diminution nette des concentrations circulantes de cytokines et d'autres marqueurs de l'inflammation. Cela semble

indiquer que le tissu adipeux contribue à la libération de molécules inflammatoires ayant, par la suite, des effets sur le cerveau. En effet, en 2011, nous avons observé que la baisse des concentrations de cytokines liée à une perte de poids s'accompagne d'une amélioration de l'état psychologique des sujets.

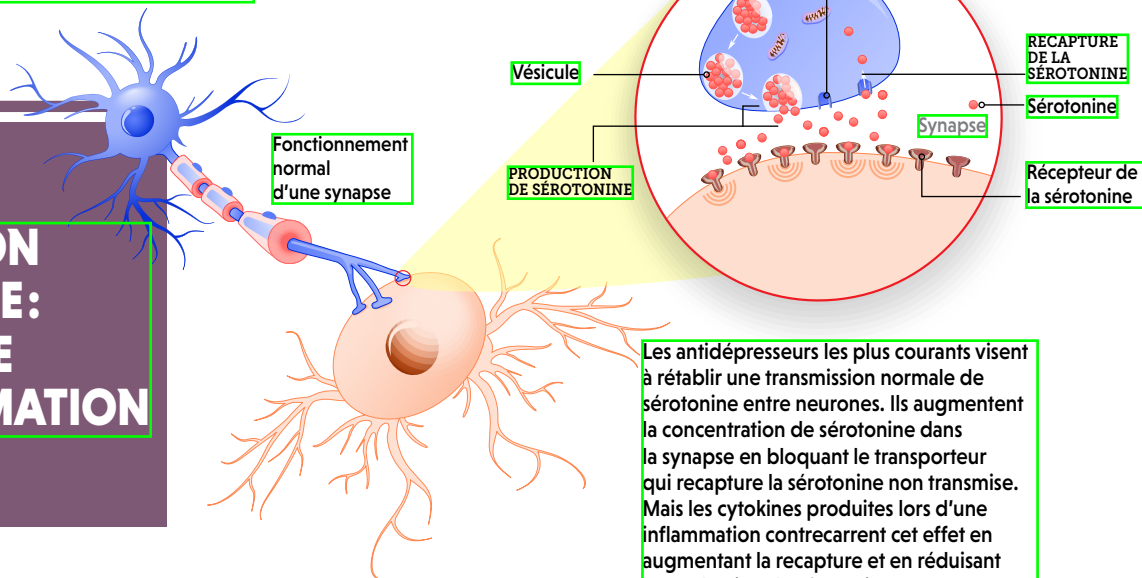
De telles observations laissent entrevoir un lien de causalité entre l'obésité, l'inflammation et la dépression, mais peut-on en avoir une preuve directe ? Chez l'animal, les expérimentations vont en ce sens. Nous avons ainsi montré en 2014 que des souris qui deviennent obèses à cause d'un régime riche en gras et en sucre développent une inflammation (y compris une activation de l'enzyme IDO dans le cerveau) et des comportements de type dépressif beaucoup plus graves en réponse à une stimulation immunitaire que des souris minces.

D'autres études réalisées chez l'animal nous ont aussi permis de montrer que certaines structures cérébrales comme l'hippocampe, qui joue un rôle clé dans le contrôle de l'humeur, semblent particulièrement sensibles aux effets délétères de l'inflammation. En effet, chez des souris génétiquement obèses (à cause d'une mutation du récepteur de la leptine qui, normalement, réduit la sensation de satiété après avoir mangé), certains troubles du comportement émotionnel apparaissent liés à une inflammation et à un dysfonctionnement des neurones de l'hippocampe.

Par ailleurs, de plus en plus d'études suggèrent que la dépression augmente le risque d'obésité : un cercle vicieux s'installe alors, qu'il est crucial d'enrayer.

L. C. et N. C.

DÉPRESSION RÉSISTANTE: LA PISTE DE L'INFLAMMATION



Les antidépresseurs les plus courants visent à rétablir une transmission normale de sérotonine entre neurones. Ils augmentent la concentration de sérotonine dans la synapse en bloquant le transporteur qui recapture la sérotonine non transmise. Mais les cytokines produites lors d'une inflammation contrecarrent cet effet en augmentant la recapture et en réduisant la production de sérotonine.

La dépression est une maladie complexe dont l'évolution est souvent récidivante, voire chronique, d'autant plus que près de 30% des patients ne répondent pas aux traitements antidépresseurs standard. Améliorer cette réponse thérapeutique constitue donc un enjeu de taille afin de soulager les patients concernés. Mais comment expliquer une telle résistance aux traitements?

Cette résistance s'explique notamment par l'absence de biomarqueurs spécifiques de la pathologie et par le manque actuel d'avancées réelles dans le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques ciblées. La complexité des symptômes caractérisant la dépression, accentuée par l'histoire de vie et les traits de personnalité des patients, complique sans aucun doute l'identification de traitements efficaces chez le plus grand nombre. En outre, l'incidence croissante de pathologies chroniques associées à une symptomatologie dépressive amplifie ce phénomène. Mais différentes données récentes suggèrent que l'inflammation contribuerait non seulement à la survenue de la dépression, mais aussi au développement de la résistance aux antidépresseurs.

Les processus inflammatoires occupent une position centrale dans l'articulation entre les différents facteurs susceptibles d'accentuer la résistance aux antidépresseurs, et les systèmes de neurotransmission (en particulier sérotoninergique) dont le dysfonctionnement a été impliqué dans l'étiologie de la dépression. Confortant cette hypothèse, diverses études cliniques menées ces

dernières années suggèrent que la présence d'un état inflammatoire plus élevé que la normale, quelle qu'en soit l'origine, conditionnerait une mauvaise réponse thérapeutique. Ainsi, des patients dépressifs souffrant de pathologies associées à une inflammation chronique, comme l'obésité ou le syndrome métabolique, sont plus souvent résistants aux antidépresseurs.

À l'inverse, des traitements à visée anti-inflammatoire améliorent les symptômes dépressifs des patients déprimés présentant des signes d'inflammation. En effet, de nombreuses observations cliniques indiquent que des médicaments anti-inflammatoires, en particu-

lièrement chez les patients présentant une inflammation. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les cytokines inflammatoires et la grande majorité des médicaments antidépresseurs ciblent les mêmes systèmes cérébraux, mais avec des effets diamétralement opposés (voir la figure).

Dans ce contexte, la possibilité de cibler l'inflammation pour améliorer la réponse aux traitements antidépresseurs dans ces populations apparaît donc comme une alternative particulièrement pertinente. Certains points doivent cependant encore être précisés. Il est en effet important de bien définir les processus inflammatoires à viser pour éviter, ou réduire autant que faire se peut, les importants effets secondaires dont pâtissent souvent les traitements anti-inflammatoires chroniques à large spectre. Un moyen de limiter ces effets consiste à cibler certains facteurs inflammatoires en particulier (par exemple certaines cytokines, comme le $\text{TNF-}\alpha$) ou à agir sur les cibles neurobiologiques de ces facteurs (par exemple les voies enzymatiques impliquées dans le métabolisme des neurotransmetteurs) plutôt que sur l'inflammation elle-même. L'identification de molécules candidates pour remplacer ou compléter les traitements antidépresseurs actuels est le défi que nous allons essayer de relever dans les années à venir. Les résultats soulignant le rôle de l'enzyme IDO dans l'induction de dépressions en conditions inflammatoires font de cette molécule une piste particulièrement intéressante à explorer.

Cytokines et antidépresseurs ciblent les mêmes systèmes cérébraux, mais avec des effets opposés

lier des bloqueurs du facteur de nécrose tumorale ($\text{TNF-}\alpha$) qui sont classiquement utilisés dans le traitement de maladies auto-immunes comme le psoriasis ou l'arthrite rhumatoïde, améliorent les altérations de l'humeur fréquemment retrouvées dans ces maladies. En outre, les premiers essais d'administration d'anti- $\text{TNF-}\alpha$ chez des patients souffrant de dépression et résistants aux traitements antidépresseurs classiques sont encourageants puisqu'ils semblent

L. C. et N. C.

- durables que ceux du comportement de maladie: dans les cas de dépression grave, ces symptômes, auxquels s'ajoutent un sentiment de culpabilité, une dévalorisation de soi et des idées suicidaires, se manifestent tous les jours pendant au moins deux semaines, contre quelques jours dans le comportement de maladie.

DES CYTOKINES DÉPRIMANTES

Les premiers travaux ayant établi un lien entre l'immunité et les symptômes dépressifs ont mis en évidence une diminution de la réponse immunitaire chez des patients dépressifs. En 1983, Ziad Kronfol, de l'université du Michigan à Ann Harbor, et ses collègues ont ainsi montré que chez de tels patients, les lymphocytes proliféraient moins que chez des personnes non dépressives, en présence d'un agent favorisant habituellement leur activation. Et en 1987, Michael Irwin et Christian Gillin, de l'université de Californie à San Diego, ont observé qu'une famille de cellules de l'immunité innée, les cellules tueuses naturelles, était bien moins active chez des patients dépressifs.

Puis, dans les années 1990, on a découvert que les concentrations sanguines de cytokines chez certains patients dépressifs, et plus particulièrement chez ceux souffrant de dépressions graves ou récurrentes, étaient supérieures à la moyenne. Fait notable: les symptômes reculaient dès lors que les paramètres immunitaires s'amélioraient. De telles données ont étayé l'hypothèse selon laquelle certaines dépressions résulteraient de réactions inflammatoires ou seraient liées aux cytokines. D'après cette hypothèse, les cytokines participeraient à la physiopathologie de la dépression en raison de leurs effets importants sur l'humeur.

Plusieurs équipes ont alors mené des études chez l'humain et chez l'animal pour

déterminer le rôle de l'inflammation dans l'apparition des symptômes dépressifs. Chez l'humain, la démonstration la plus convaincante est venue de l'immunothérapie par administration chronique de cytokines. Les cytokines, en particulier l'interféron IFN- α , ont en effet une action immunorégulatrice, antiproliférative et antivirale. Aussi sont-elles utilisées dans le traitement de certains cancers et de pathologies virales chroniques comme l'hépatite C. Or, malgré son efficacité thérapeutique, l'immunothérapie par IFN- α a d'importants effets secondaires comportementaux, se manifestant notamment par l'apparition de symptômes affectifs et cognitifs qui compromettent la poursuite du traitement.

Souvent considérées comme imprévisibles, ces complications avaient longtemps fait l'objet de simples observations cliniques, mais plus rarement d'études prospectives et systématiques. Afin de mieux comprendre ces effets, nous avons travaillé pendant plusieurs années avec des patients recevant de fortes doses répétées d'interféron IFN- α pour le traitement d'un mélanome malin ou d'une hépatite C. Les patients étaient inclus dans les études avant la mise en route de l'immunothérapie et suivis à intervalles réguliers au cours de la première année de traitement. Nous avons ainsi montré en 2002 que l'administration chronique d'interféron induit, chez 30 à 50% des patients traités, un syndrome dépressif qu'il est possible de prévenir par l'administration prophylactique d'un traitement antidépresseur.

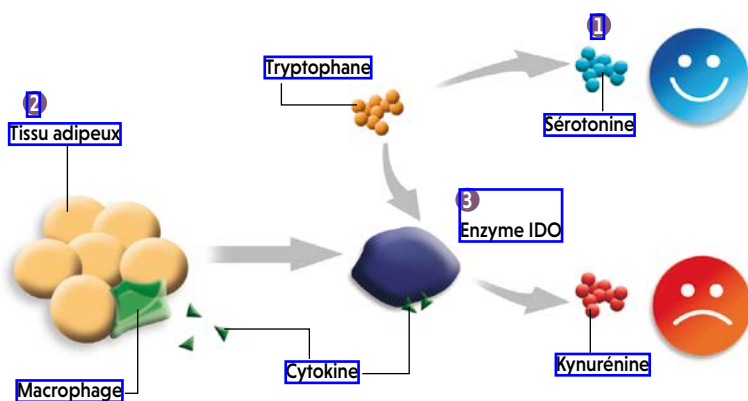
LES SYSTÈMES DE RÉGULATION DE L'HUMEUR PERTURBÉS

Le syndrome dépressif consécutif à l'administration de cytokines s'installe généralement au cours du deuxième mois d'immunothérapie et s'améliore à l'arrêt de ce traitement. En étudiant le comportement des patients, en réalisant des analyses biochimiques et des examens par imagerie cérébrale, nous avons ensuite montré que l'apparition des symptômes dépressifs sous interféron IFN- α est associée à des altérations marquées de l'activité de systèmes cérébraux impliqués dans la régulation de l'humeur et cibles des médicaments antidépresseurs.

Parmi ces systèmes touchés, on trouve notamment ceux dits dopaminergique et sérotoninergique, des populations de neurones spécialisées dans la synthèse et la libération de dopamine et de sérotonine, respectivement. En particulier, nos résultats d'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle et de tomographie par émission de positrons indiquent que le traitement à l'IFN- α s'accompagne d'importantes modifications de l'activité cérébrale dans les ganglions de la base, un ensemble de structures situées sous le cortex, et dans le cortex frontal. Et dans une structure

DES CYTOKINES À LA DÉPRESSION

Le tryptophane, un acide aminé uniquement fourni par l'alimentation, est transformé par une enzyme en sérotonine (1), qui régule l'humeur. Lors d'une inflammation, par exemple liée à l'obésité, des cytokines sont produites (2). Chez une personne obèse, notamment, le tissu adipeux favorise cette production. Les cytokines renforcent la dégradation du tryptophane par l'enzyme IDO, ce qui entraîne une augmentation de ses produits, telle la kynurénine (3), aux dépens de la synthèse de sérotonine. Les cytokines contribuent ainsi à induire une humeur dépressive.



des ganglions de la base, nommée striatum, l'activité dopaminergique est perturbée. Par ailleurs, l'importance de ces modifications est corrélée à l'intensité des symptômes dépressifs, des troubles de la motivation et de la fatigue. De même, ces dernières années, d'autres études précliniques et cliniques ont décrit une association entre inflammation et perturbations du système sérotoninergique, elles-mêmes généralement associées au développement de symptômes dépressifs.

UNE VOIE ENZYMATIQUE RELIANT HUMEUR ET IMMUNITÉ

Ainsi, l'administration de cytokines fait apparaître des symptômes dépressifs et d'importantes modifications de l'activité cérébrale. Mais comment les cytokines influent-elles sur l'humeur? Une piste est liée à leur action sur des voies enzymatiques. Les cytokines sont en effet connues pour activer de façon spécifique diverses enzymes. Dès les années 1980, notamment, des immunologistes ont montré que certaines cytokines produites au cours de la réponse inflammatoire modulent la réactivité des lymphocytes en activant une enzyme, l'indoléamine-2,3-dioxygénase ou IDO. Sous l'action des cytokines, cette enzyme normalement inactive se met à dégrader un acide aminé essentiel à la multiplication des lymphocytes, le tryptophane.

Or cette enzyme existe non seulement dans des cellules immunitaires, mais aussi dans le cerveau, où des cellules ont justement besoin de tryptophane pour fabriquer la sérotonine. Le tryptophane fait partie de ces acides aminés que l'organisme ne sait pas produire et qui ne sont fournis que par l'alimentation. Aussi, si des cytokines activent l'IDO dans des cellules immunitaires circulantes et dans le cerveau, la quantité de tryptophane circulant dans l'organisme chute et le peu de tryptophane qui parvient au cerveau est dégradé par l'enzyme activée. Les conditions sont donc réunies pour que la sérotonine ne soit pas suffisamment produite. Or ce neurotransmetteur est essentiel au fonctionnement du cerveau et à la santé mentale: un manque de sérotonine a été impliqué au moins dans certaines formes de dépression. En outre, de très nombreux médicaments antidépresseurs exercent leur effet thérapeutique en agissant sur la disponibilité de la sérotonine. Ainsi, quand le tryptophane n'est plus présent en assez grande quantité, notamment parce qu'il a été dégradé à l'excès à la suite de l'activation de l'IDO, la concentration de la sérotonine est trop faible et les symptômes dépressifs risquent de s'installer.

Ce n'est pas tout. L'activation de la voie enzymatique commandée par l'IDO entraîne la production de différents dérivés toxiques pour les neurones, qui peuvent, à terme, contribuer également à des perturbations de l'humeur. En

En présence de cytokines, la production de sérotonine, régulatrice de l'humeur, est insuffisante

effet, à la suite de l'activation de l'IDO et des autres enzymes de cette voie par les cytokines inflammatoires, le tryptophane est transformé en kynurénine. Or, dans le cerveau, cette molécule est elle-même transformée en divers composés qui, en perturbant le système neuronal qui libère le glutamate (le système glutamatergique) et en favorisant le stress oxydant, conduisent à la destruction des neurones.

L'activation de l'IDO par les cytokines pourrait ainsi être l'un des mécanismes sous-tendant l'apparition de symptômes dépressifs dans un contexte inflammatoire. À l'appui de cette hypothèse, nous avons observé, chez les patients traités par interféron IFN- α et ayant développé un épisode dépressif grave au cours de ce traitement, une diminution plus prononcée et durable des taux de tryptophane, ainsi qu'une hausse plus marquée des concentrations de kynurénine par rapport aux patients dont l'humeur restait stable au cours du traitement.

QUELLES THÉRAPIES?

Des solutions thérapeutiques peuvent-elles émerger de ces nouvelles connaissances? Nos travaux menés dans des modèles animaux fournissent des résultats particulièrement intéressants dans ce contexte. En effet, en empêchant l'activation des cytokines, ou en bloquant l'action de l'IDO par des molécules appropriées, nous avons observé en 2009 que la présence d'une inflammation chez des souris de laboratoire ne provoque plus de signes répertoriés comme associés à une dépression chez ces animaux. De même, des souris génétiquement modifiées pour ne plus produire cette enzyme, ou d'autres enzymes de cette voie impliquées dans la production de molécules toxiques pour les neurones, ne développent plus de symptômes dépressifs après une inflammation. Cela suggère donc bien que les cytokines altèrent le fonctionnement cérébral et induisent des symptômes de dépression en dégradant le tryptophane. Un moyen de contrer cet effet serait d'enrayer cette chaîne enzymatique par des traitements adaptés. Cette approche thérapeutique

PRIX MARCEL DASSAULT 2018

En décembre dernier, Lucile Capuron a reçu le prix Marcel Dassault, qui soutient depuis 2012 des projets de recherche sur les maladies mentales. Doté de 300 000 euros, il aidera son équipe à monter une étude clinique visant à étudier l'activité de deux voies enzymatiques, la voie IDO et la voie BH4, impliquées respectivement dans la production de sérotonine et de dopamine, chez 50 patients souffrant de dépression résistante et recrutés en fonction de leur état inflammatoire (et 20 sujets contrôles). L'altération de ces voies due à l'inflammation perturbe-t-elle la production de ces neurotransmetteurs et l'humeur des patients? C'est la question à laquelle il s'agira de répondre. L'équipe vérifiera par ailleurs chez l'animal que les perturbations des voies IDO et BH4 sont bien la cause des effets neurologiques observés. Cette étude devrait durer trois ans.

BIBLIOGRAPHIE

L. Capuron et N. Castanon, **Role of inflammation in the development of neuropsychiatric symptom domains : evidence and mechanisms**, *Curr. Top. Behav. Neurosci.*, vol. 31, pp. 31-44, 2017.

L. Capuron et al., **Role of adiposity-driven inflammation in depressive morbidity**, *Neuropsychopharmacol. Reviews*, vol. 42, pp. 115-128, 2017.

L. Capuron et al., **Neurobehavioral effects of interferon- α in cancer patients : phenomenology and paroxetine responsiveness of symptom dimensions**, *Neuropsychopharmacol.*, vol. 26, pp. 643-652, 2002.

serait particulièrement pertinente chez les patients dépressifs présentant une inflammation chronique, quelle qu'en soit l'origine.

Certaines formes de dépression apparaissent donc liées à d'autres maladies chroniques tout aussi alarmantes en termes de santé publique, comme les maladies métaboliques ou cardiovasculaires, et aux processus inflammatoires associés. Comment mieux la prévenir et la traiter dans ce contexte ? Les maladies chroniques, par exemple l'obésité ou le syndrome métabolique, pourraient constituer en tant que telles un facteur de risque de la dépression, en enclenchant notamment des phénomènes inflammatoires de faible intensité, mais chroniques, qui finiraient par altérer les interactions du cerveau et du système immunitaire. De surcroît, d'autres maladies plus directement liées au système immunitaire (maladies inflammatoires ou auto-immunes) se multiplient et gagneraient à être considérées sous cet angle. Le rôle du stress psychosocial et des habitudes de vie, comme le manque d'activité physique et la suralimentation, doit aussi être pris en compte.

Du côté des traitements, en plus de l'approche pharmacologique à visée curative, l'approche préventive consistera à informer le public des risques liés à des habitudes de vie

favorisant l'activation de processus inflammatoires susceptibles de conduire à la dépression. Ainsi, une condition physique stable et une alimentation mesurée limiteraient les risques d'inflammation pouvant conduire à la dépression. De plus en plus d'études suggèrent par ailleurs que la consommation de certains nutriments essentiels, qui présentent des propriétés anti-inflammatoires ou neuromodulatrices (les acides gras polyinsaturés de type omega-3, certains acides aminés, des composés naturels issus de plantes, etc.), aurait un impact bénéfique sur l'humeur.

Chez les personnes déprimées, se poser la question d'un état ou d'une maladie inflammatoire et d'un lien éventuel avec le surpoids deviendra peut-être une approche efficace pour de nombreux malades. C'est particulièrement vrai pour ceux qui ne répondent pas aux traitements antidépresseurs classiques, c'est-à-dire ciblant les systèmes de neurotransmission sérotoninergique (voir l'encadré page 38). Ainsi, les stratégies thérapeutiques visant à traiter l'inflammation ou à contrer ses effets sur le fonctionnement cérébral sont particulièrement prometteuses pour améliorer la prise en charge des patients souffrant de dépression. Et devraient aider à développer enfin une médecine de précision en psychiatrie. ■

À PARTIR DE 12 ANS

VOYAGE AU CŒUR DE L'ÉVOLUTION

RÉALITÉ VIRTUELLE

GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION
Ouvert les mercredis, week-ends et vacances scolaires
Jardin des Plantes - 36 rue Geoffroy St-Hilaire - Paris 5^e
Réservation obligatoire sur : MNHN.FR

orange VIVE DELL EMC

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

L'ESSENTIEL

> Dès qu'un patient présente un symptôme psychologique, comme une joie de vivre en berne, les médecins ont tendance à diagnostiquer une maladie psychiatrique.

> Pourtant, nombre de symptômes de ce type ont des causes organiques, comme une carence en vitamine,

une inflammation ou un trouble hormonal.

> Tous ces cas sont pris en charge par l'organopsychiatrie, mouvement qui se développe et qui atteste des connaissances croissantes sur les interactions entre le corps et le psychisme.

LES AUTEURS

ALEXIS BOURLA
praticien attaché au service de psychiatrie de l'hôpital Saint-Antoine, à Paris, et psychiatre libéral

FLORIAN FERRERI
maître de conférences des universités, praticien hospitalier dans le service de psychiatrie de l'hôpital Saint-Antoine

STÉPHANE MOUCHABAC
praticien hospitalier dans le service de psychiatrie de l'hôpital Saint-Antoine

Nicolas est un jeune homme d'une vingtaine d'années qui a tenté de se suicider en avalant des produits toxiques. Quand il arrive à l'hôpital, l'urgence est de le sauver et les chirurgiens doivent lui enlever une partie de l'estomac et de l'œsophage. Ensuite, le diagnostic tombe: dépression sévère. On lui prescrit des médicaments et une psychothérapie, qu'il suit pendant quelque temps, puis on le perd de vue. Les années passent et Nicolas est à nouveau amené aux urgences, cette fois par la police et dans un état d'agitation important.

Vivant dans la rue depuis presque un an, il ne prend plus soin de lui, parle tout seul, répond aux questions de manière totalement inadaptée et souffre d'hallucinations auditives. Les soignants s'interrogent, enquêtent, et reconstituent peu à peu les parties manquantes de son histoire. Quelques mois après sa dépression, alors qu'il s'en était remis, il a vu son état se dégrader de nouveau progressivement. Il a fini par quitter sa compagne sur un coup de tête, puis s'est mis à errer dans la ville sans raison, en délirant sur un complot à son encontre. Un nouveau diagnostic est alors posé: schizophrénie. L'état de Nicolas est grave, il est hospitalisé en psychiatrie. Mais plusieurs mois de traitements ne donneront aucun résultat. Le patient enchaîne les médicaments antipsychotiques sans le moindre bénéfice. Les tests sanguins standard et l'imagerie cérébrale ne révèlent rien de significatif.

On transfère alors Nicolas dans notre unité, à l'hôpital Saint-Antoine, pour effectuer des examens complémentaires, voire tenter des thérapies innovantes. Enfin, le bon diagnostic tombe: non, ce n'est pas dans la tête, rien à voir avec une

maladie mentale.

Les symptômes s'expliquent par une carence très sévère en vitamine B12. Immédiatement, nous prescrivons à Nicolas des suppléments vitaminiques. En seulement quatre semaines, ses symptômes psychiatriques disparaissent. Il sort de l'hôpital peu après. Trois mois plus tard, il a retrouvé un logement, un travail et a renoué avec son entourage.

Le cas de Nicolas est typique des «maladies organiques à expression psychiatrique», ces pathologies qui ont une cause physiologique mais miment un trouble psychiatrique. Véritables caméléons, elles sont capables d'imiter toute la gamme des maladies mentales: dépression, trouble anxieux, schizophrénie... Au sein de l'hôpital Saint-Antoine, notre service est





Ces maladies psychiatriques qui n'en sont pas

Dépression sévère ? Schizophrénie ? Non : carence en vitamines. Tel est l'étonnant diagnostic que reçoivent certains patients, victimes de pathologies dites organopsychiatriques. Véritables caméléons, ces pathologies miment toutes sortes de maladies mentales et provoquent souvent une longue errance médicale.

régulièrement confronté à ces cas où s'estompe la frontière entre ce qui tient du corps et de l'esprit. Certaines études estiment qu'environ 10% des diagnostics psychiatriques sont erronés, passant à côté d'une cause organique sous-jacente.

DÉPRESSION ? NON ! MANQUE DE VITAMINES

Mais revenons à Nicolas. Comment un simple manque de vitamines peut-il déclencher des symptômes aussi sévères ? La vitamine B12 est impliquée dans plusieurs cycles enzymatiques essentiels. Dès lors, sa carence entraîne le dysfonctionnement des « chaînes de fabrication » de certains neuromédiateurs clés – comme la sérotonine, impliquée dans la régulation émotionnelle –, dont la quantité diminue dans le cerveau. En outre, des dérivés toxiques s'accumulent, déclenchant une inflammation cérébrale. Certaines molécules produites lors de cette réaction (comme les cytokines) provoquent une hypersensibilité de l'axe du stress, une diminution supplémentaire de la production de neuromédiateurs et toutes sortes d'autres réactions qui affectent le psychisme. Au final, une carence en vitamine B12 peut perturber gravement l'humeur, voire se traduire par des troubles psychotiques chez certains patients vulnérables.

Outre les vitamines, les hormones ont une influence capitale sur le psychisme. Nombre de pathologies endocriniennes sont alors confondues avec des maladies psychiatriques. La thyroïde, une petite glande située à la base de notre cou, produit par exemple plusieurs hormones « activatrices » – qui stimulent le métabolisme –, essentielles au fonctionnement cérébral. Par conséquent, une hypothyroïdie (un manque d'hormones thyroïdiennes) peut ressembler à une dépression et une hyperthyroïdie (un excès de ces hormones) à un syndrome maniaque. Autre exemple, certaines maladies des glandes surrénales, qui fabriquent le cortisol – l'hormone du stress –, entraînent un excès chronique de cette hormone et provoquent des symptômes anxieux ou dépressifs.

En général, les médecins connaissent ces manifestations psychiatriques et contrôlent les taux d'hormones. « Tous les endocrinologues rapportent des histoires de patients présentant des signes de dépression et d'anxiété qui ont disparu après un contrôle et un rééquilibrage de leur taux d'hormone thyroïdienne », rapporte ainsi Barbara Demeneix, spécialiste de cette hormone, dans son livre *Cocktail toxique*. Toutefois, notre expérience nous incite à penser que certains cas passent sous les radars, car nous avons constaté que des modifications très minimes, dans la limite des valeurs considérées comme normales, ont parfois d'importantes répercussions sur le fonctionnement psychique. Surtout si le patient est habitué à un

taux d'hormones thyroïdiennes stable depuis de nombreuses années.

Parfois, c'est une maladie du cœur qui fausse le diagnostic. Il arrive ainsi qu'un trouble du rythme cardiaque soit pris pour un trouble anxieux : par moments, le cœur s'emballe, déclenchant une sensation d'étouffement et de vertige, doublée d'une forte angoisse – bref, tous les symptômes d'une crise de panique. Mais c'est le trouble organique qui cause le problème psychique, et non l'inverse. Le traitement de l'arythmie cardiaque permet de supprimer totalement ces « fausses » attaques de panique.

Les cancers peuvent aussi se manifester en premier lieu par des symptômes psychiatriques. Il n'est pas rare que la progression de la tumeur cause fatigue, perte d'appétit et de poids, notamment parce qu'elle provoque une inflammation chronique. Souvent, les médecins attribuent à tort ces symptômes à une baisse de moral, voire à une dépression, avant de soupçonner un cancer. En particulier chez les patients qui n'ont aucun facteur de risque associé à cette dernière maladie : ceux qui sont jeunes, non fumeurs, sportifs...

Dans de rares cas, des anticorps particuliers, susceptibles d'activer ou de détruire divers récepteurs cérébraux, sont fabriqués lors de l'inflammation. Ces récepteurs sont situés dans des structures impliquées dans la régulation émotionnelle, les images mentales, les sensations sonores... S'ensuit toute une série de manifestations psychiatriques extrêmement variables : troubles de l'humeur, psychose, hallucinations, catatonie (le patient est mutique et présente divers symptômes moteurs, comme une alternance entre passivité absolue et agitation soudaine)... On parle d'encéphalite limbique auto-immune.

L'origine de ces troubles mentaux est d'autant plus difficile à détecter que la tumeur n'est pas forcément localisée dans le cerveau. Chez Marie, une jeune femme de 22 ans que nous avons reçue il y a quelques années, elle se situait dans un ovaire (c'est souvent le cas pour un type particulier d'encéphalite, qualifié d'« anti-NMDA », du nom des récepteurs cérébraux attaqués par les anticorps). À l'origine,

10%

DÉS DIAGNOSTICS

PSYCHIATRIQUES

seraient erronés, prenant à tort une pathologie organique pour une maladie mentale.

**Parfois, c'est une
maladie du cœur qui
fausse le diagnostic**

cette patiente avait été hospitalisée pour une dépression très sévère. Devant l'inefficacité des traitements proposés, elle a fini par être adressée à notre service et nous avons recherché des anticorps anormaux dans son liquide céphalorachidien, grâce à une ponction lombaire. C'est ainsi que nous avons découvert qu'une encéphalite expliquait ses symptômes.

Des collègues chirurgiens ont procédé à l'ablation de la tumeur et Marie a reçu un traitement immunosuppresseur qui, bien souvent, atténue les symptômes, et les supprime parfois totalement. Après quelques semaines de traitement, son état s'est tellement amélioré qu'elle a pu rentrer chez elle.

D'autres maladies organopsychiatriques rares résultent d'une accumulation de certaines molécules dans le cerveau, dont le fonctionnement est perturbé. Dans la maladie de Niemann-Pick de type C, qui touche environ 1 personne sur 120000, il s'agit de dérivés du cholestérol. Cette pathologie provoque parfois un tableau psychiatrique proche de celui de la schizophrénie : les pensées et les comportements sont erratiques, le patient se replie sur lui-même, victime d'hallucinations... Les protéines qui transportent ou transforment les produits alimentaires à l'origine du cholestérol sont alors anormales, en raison de mutations génétiques.

Ce cas illustre bien les difficultés à repérer les pathologies organopsychiatriques, puisqu'en moyenne, dix ans s'écoulent entre les premiers symptômes psychiatriques et le diagnostic. Dans l'intervalle, on prescrit souvent des médicaments psychotropes, qui restent largement inefficaces.

S'il existe de multiples dysfonctionnements organiques susceptibles de causer des symptômes psychiatriques, à l'inverse, des symptômes physiques ont parfois une cause psychiatrique. C'est ce qu'on appelle un trouble conversif (autrefois nommé conversion hystérique). Le patient présente alors des symptômes moteurs (paralysie, mouvements anormaux) ou des déficits sensoriels, comme une cécité ou une surdité soudaine. Il peut aussi être victime de crises convulsives – qui ressemblent à des crises épileptiques, sauf qu'on ne détecte aucune anomalie lorsqu'on mesure l'activité cérébrale par électroencéphalographie.

La fréquence exacte du trouble conversif est difficile à évaluer, du fait de la diversité de ses manifestations, mais il n'a rien de rare. Certaines études estiment qu'il concerne 4% des patients qui viennent consulter pour des troubles du mouvement.

UNE MALADIE GLOBALE DU CERVEAU

Souvent catégorisée comme une création de l'esprit, cette pathologie est pourtant bien réelle – les symptômes ne sont en rien « imaginaires ». Récemment, plusieurs travaux utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont montré qu'elle est associée à de multiples anomalies du fonctionnement cérébral. « Le trouble conversif peut être considéré comme une maladie "globale" du cerveau », selon Ismaël Conejero et ses collègues de l'université de Montpellier, qui ont récemment dressé la synthèse de ces travaux. La cause ? Un mauvais fonctionnement de réseaux neuronaux impliqués dans la planification, l'organisation et l'exécution des mouvements volontaires, mais aussi dans la conscience du corps et dans l'agentivité (le sentiment d'être à l'origine de ses propres actions). Les chercheurs ont aussi mis en évidence des liens inhabituels entre les régions cérébrales sous-tendant les émotions et les systèmes sensoriel et moteur.

Néanmoins, ce trouble est la source de nombreuses erreurs de diagnostic, notamment parce qu'on peine parfois à le distinguer d'une simulation pure et simple. Mais aussi parce que les cliniciens ont tendance à l'incriminer dès qu'ils ne trouvent pas de cause organique : « Si on n'a rien d'évident, c'est que c'est hystérique »... Tout particulièrement quand le patient est une femme (elles sont certes plus touchées) ou présente un « trouble de la personnalité histrionique », caractérisé par des émotions exacerbées »

POURQUOI TANT D'ERREURS DE DIAGNOSTIC

La plupart du temps, les cliniciens posent leur diagnostic en se fondant sur un entretien non standardisé, qu'ils interprètent selon leur expérience et leurs opinions personnelles au lieu d'utiliser une approche systématique.

Certes, ils tranchent ainsi plus rapidement que s'ils devaient passer en revue un grand nombre de causes potentielles, et parviennent à se décider même lorsqu'ils ne disposent que d'informations incomplètes, mais ils risquent aussi davantage de se tromper. Soit parce qu'ils se sont forgé une représentation typique de la maladie, et donc échouent à identifier cette dernière dès qu'elle s'écarte un peu de ce prototype, soit parce qu'ils attribuent un poids excessif à certains symptômes. Par exemple, pour la schizophrénie, les psychologues américaines Nancy Kim et Woo-Kyoung Ahn ont montré en 2002 que les cliniciens considèrent le délire et les hallucinations comme plus significatifs que la présence d'un discours désorganisé ou de symptômes « négatifs » (anxiété, apathie, retrait social) ; pourtant, toutes les études concluent que ces critères sont en réalité bien plus caractéristiques de la maladie.

Ces méthodes intuitives, qualifiées d'heuristiques, conduisent en outre souvent à poser un diagnostic psychiatrique dès qu'un symptôme évoque ce type de maladie, et à passer à côté d'une cause organique. C'est d'autant plus problématique qu'on ne dispose pas d'exams complémentaires en psychiatrie : si un patient est diagnostiqué dépressif ou schizophrène, aucun marqueur biologique, détectable par exemple à l'aide d'un test sanguin ou d'une IRM, ne permettra de confirmer ou d'infirmer ce diagnostic. Cela viendra peut-être : de nombreux laboratoires sont à la recherche de tels marqueurs...

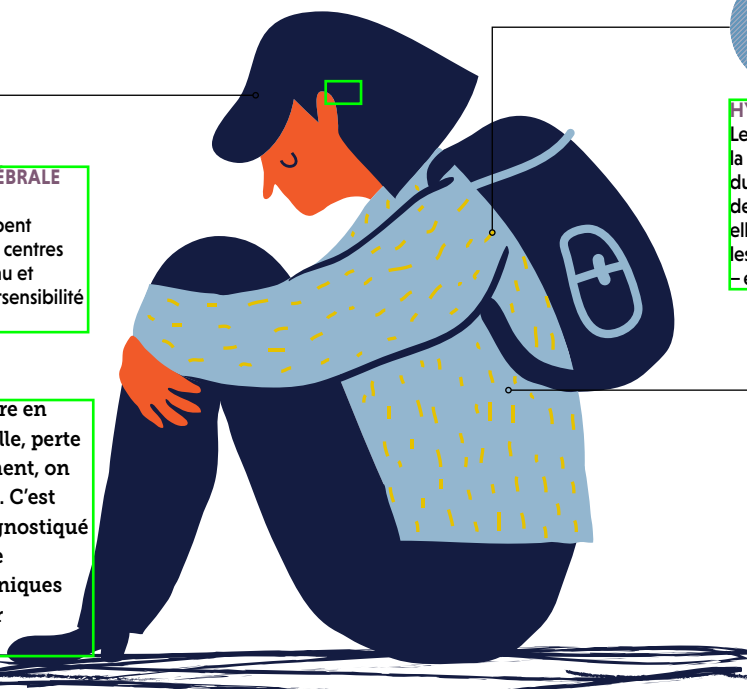
DES MALADIES QUI MIMENT LA DÉPRESSION



INFLAMMATION CÉRÉBRALE

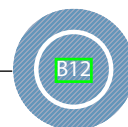
Certaines molécules inflammatoires perturbent le fonctionnement des centres émotionnels du cerveau et provoquent une hypersensibilité de l'axe du stress.

Idées noires, joie de vivre en berne, fatigue perpétuelle, perte d'appétit... Immédiatement, on pense à une dépression. C'est d'ailleurs ce qui est diagnostiqué en général. Pourtant, de multiples troubles organiques peuvent aussi expliquer ces symptômes.



HYPOTHYROIDIE

Les hormones fabriquées par la glande thyroïde, à la base du cou, stimulent le métabolisme des cellules nerveuses. Quand elles sont en quantité insuffisante, les neurones baissent de régime – et la joie de vivre aussi!



CARENCE EN VITAMINE

Les vitamines B12 et B9 interviennent dans la fabrication de plusieurs neuromédiateurs essentiels à la régulation de l'humeur. Une carence peut alors avoir des conséquences psychologiques sévères.

et une constante recherche d'attention. Pourtant, les recherches les plus récentes montrent que ce dernier n'est pas spécialement associé au trouble conversif.

UN TROUBLE QUI PROGRESSE, UNE THÉRAPIE QUI PIÉTINE

S'ensuivent de pénibles errances médicales, comme l'illustre le cas de Charlotte, 27 ans. Agent d'entretien dans une grande enseigne de supermarché, elle a subi une triple fracture de la jambe gauche à la suite d'un accident de voiture. Après quelques semaines de rééducation, elle n'arrive toujours pas à la réutiliser correctement. Pire, elle a de plus en plus de mal à bouger sa jambe droite, épargnée par l'accident. Pendant plusieurs mois, elle est clouée au lit ou dans un fauteuil. Le moral en chute libre, elle commence à déprimer. Apparaissent alors de nouveaux symptômes : à son tour, son bras droit donne des signes de paralysie. Les douleurs s'accumulent dans les jambes et dans le dos. Scanner des jambes et du cerveau, IRM cérébrale et médullaire, électroneuromyogramme (un test visant à vérifier que les nerfs ne sont pas endommagés)... Rien n'y fait, la cause reste mystérieuse. La patiente est alors adressée en neurologie, pour y être examinée de la tête aux pieds pendant quinze jours. Une ponction lombaire ne livre pas la clé du mystère : ni le cerveau ni la moelle ne semblent atteints. Quant au scanner des jambes, il ne montre aucune anomalie

susceptible d'expliquer les symptômes. La conclusion des médecins tombe : trouble conversif. Autrement dit, « c'est dans sa tête ».

Commence alors pour Charlotte un long périple dans plusieurs établissements psychiatriques. Elle enchaîne les médicaments : antidépresseurs, régulateurs d'humeur, antipsychotiques... Peine perdue. Devant l'absence d'amélioration, elle est envoyée en convalescence dans un centre de rééducation, où des examens complémentaires sont demandés. Et c'est enfin le bout du tunnel ! Une petite fracture est détectée au niveau de l'épaule, expliquant les douleurs dorsales et la rigidité du bras ; elle était passée inaperçue jusque-là car elle se situait dans une zone particulièrement difficile à visualiser, à l'intersection de l'omoplate et de l'humérus. On découvre aussi une maladie inflammatoire sévère, la neuroalgodystrophie, qui explique la paralysie progressive des membres inférieurs. Charlotte reçoit un traitement adapté, à base d'antalgiques, d'anti-inflammatoires et de kinésithérapie. Au bout de quelques semaines, elle se remet à marcher. Puis reprend progressivement le cours de sa vie.

Le cas de Charlotte n'est pas isolé : posé trop tôt, le diagnostic de trouble conversif peut faire passer à côté de plusieurs autres pathologies organiques, comme la sclérose en plaques. Il révèle toute l'ampleur des défis auxquels sont confrontés les cliniciens : Charlotte était victime d'un trouble organique – une

BIBLIOGRAPHIE

A. Bourla et al., **Troubles psychiatriques : quels bilans biologiques ?**, *La Revue du Praticien – Médecine Générale*, n° 1010, pp. 790-791, 2018.

I. Conejero et al., **Neuroanatomy of conversion disorder : towards a network approach**, *Rev. Neurosci.*, vol. 29, pp. 355-368, 2018.

K. Mikkelsen et al., **The Effects of Vitamin B in Depression**, *Curr. Med. Chem.*, vol. 23, pp. 4317-4337, 2016.

A. H. Miller et C. L. Raison, **The role of inflammation in depression : From evolutionary imperative to modern treatment target**, *Nat. Rev. Immunol.*, vol. 16, pp. 22-34, 2015.

C. Demily et F. Sedel, **Psychiatric manifestations of treatable hereditary metabolic disorders in adults**, *Ann. Gen. Psychiatry*, vol. 24, pp. 13-27, 2014.

Une schizophrénie qui survient avant 15 ans ou après 40 ans peut se révéler être une maladie organique

fracture et une inflammation – qui mimait une pathologie psychiatrique – le trouble conver-sif –... imitant elle-même une autre maladie organique, la paralysie!

On touche là une des difficultés majeures auxquelles est confrontée la psychiatrie, car on ne peut multiplier indéfiniment les examens coûteux. Comment décider s'il faut accepter une cause «psychologique» ou persévérer dans la réflexion diagnostique?

Parfois, des symptômes neurologiques légers pointent vers une maladie organique, mais dans un certain nombre de cas, seules les manifestations psychiatriques sont visibles. La clé est alors de repérer certains symptômes atypiques, comme des troubles cognitifs «inhabituels», un début tardif ou au contraire trop

précoce de la maladie, des hallucinations visuelles, l'inefficacité de certains traitements ou la présence d'effets secondaires fréquents et sévères...

Prenons l'exemple d'un patient qui a le moral à zéro et peine à retrouver ses souvenirs. Est-ce une dépression? Il arrive en effet que cette maladie soit associée à des perturbations mémorielles, mais elles sont modérées et indirectes, causées par des troubles de l'attention: les patients semblent par exemple avoir oublié qu'ils ont croisé un ami dans la rue car ils n'y ont pas prêté attention sur le moment ou ont du mal à focaliser leur esprit sur ce souvenir. Cependant, leur cerveau a tout de même enregistré l'information et quand on leur donne un indice («Y a-t-il longtemps que vous avez vu Untel?»), ils se la rappellent. Si ce n'est pas le cas ou si les pertes de mémoire sont importantes, alors ce n'est peut-être pas une dépression et la piste organopsychiatrique mérite d'être explorée.

COMMENT REPÉRER CES PATHOLOGIES?

L'âge où la pathologie s'est déclarée constitue aussi un indice précieux, car la plupart des maladies psychiatriques connaissent des pics épidémiologiques. La schizophrénie, par exemple, débute souvent au début de l'âge adulte. Si une maladie qui lui ressemble survient avant 15 ans ou après 40, il y a un risque que son origine soit organique. Bien sûr, cela devra être confirmé par des examens plus poussés, car il existe des formes de schizophrénie infantiles ou tardives. Autre exemple: le trouble anxieux généralisé. Son pic de fréquence se situant entre 20 et 30 ans, si un trouble qui en a tous les symptômes survient vers 50 ans, il a peut-être une cause organique, comme l'arythmie cardiaque que nous avons évoquée. Là encore, ce n'est qu'un indice (les troubles anxieux peuvent survenir à tout âge), à combiner avec d'autres. Par exemple les antécédents cardiaques du patient.

D'autres signes doivent alerter, comme la présence d'hallucinations visuelles. En effet, les patients victimes de troubles psychiatriques ont plutôt des hallucinations auditives: ils entendent des voix. Enfin, les antécédents familiaux sont à prendre en compte, car la plupart des maladies organopsychiatriques ont une composante génétique.

Pour dénouer les fils de ces cas complexes, le service de psychiatrie de l'hôpital Saint-Antoine a tissé de longue date des liens privilégiés avec les services de neurologie et de médecine interne. Dès lors, au moindre signe anormal, un psychiatre, un neurologue et un médecin interniste se réunissent pour décider s'il y a lieu de suspecter une cause organique. Quand la réponse est affirmative, ils lancent une large gamme d'examens complémentaires, visant à traquer les principales pathologies >

REPÉRER LES SYMPTÔMES INHABITUELS

Maladie mentale ou trouble organopsychiatrique? Certains symptômes doivent orienter vers la seconde option. Bien sûr, pris séparément, ils ne suffisent pas pour trancher. C'est le recoupement de plusieurs indices qui conduit au bon diagnostic

Symptômes confusionnels: désorientation temporelle ou spatiale, difficulté à fixer son attention...

Hallucinations visuelles: formes, personnes ou scènes «vues» par le patient (phénomène assez rare dans les maladies psychiatriques, où les hallucinations auditives sont plus fréquentes).

Troubles cognitifs: pertes de mémoire, baisse des performances intellectuelles ou des capacités d'apprentissage.

Catatonie: mutisme, alternance entre passivité absolue et agitation soudaine.

Résistance au traitement: inefficacité des médicaments prescrits, voire effets indésirables fréquents ou sévères.

Symptômes neurologiques: épilepsie, tremblements, perte d'équilibre, rigidité, mouvements anormaux, douleurs inexpliquées...

Symptômes digestifs: douleurs abdominales, perte d'appétit.

État fluctuant: variations fréquentes des symptômes.

évoquées dans cet article (et bien d'autres encore) : dosages sanguins particuliers, analyses génétiques, imagerie cérébrale...

De plus en plus de centres hospitaliers universitaires entament aussi des recherches sur ces maladies organopsychiatriques. Les progrès des connaissances devraient permettre de mieux soigner non seulement ces maladies, mais peut-être aussi d'authentiques maladies psychiatriques. En effet, dans ces dernières, les éléments perturbateurs identifiés (inflammation, carences vitaminiques, troubles hormonaux, etc.) interviennent souvent en tant que facteurs aggravants : ils modulent la vulnérabilité du cerveau face aux épreuves auxquelles nous sommes soumis, comme un deuil ou un licenciement, qui augmentent le risque de dépression. On estime ainsi qu'une inflammation cérébrale cause ou aggrave les symptômes dans 20 à 30% des dépressions. Quand elle est provoquée par un élément psychologique, comme un stress excessif, un cercle vicieux s'instaure : le stress cause une inflammation, qui accroît la vulnérabilité au stress. C'est ce qui explique que les personnes victimes de traumatismes infantiles aient des réponses inflammatoires particulièrement marquées face aux événements stressants, comme l'a montré en 2006 Thaddeus Pace, de l'université Emory, aux États-Unis.

MALADIE PSYCHIATRIQUE SUSPECTÉE ? UN BILAN BIOLOGIQUE S'IMPOSE

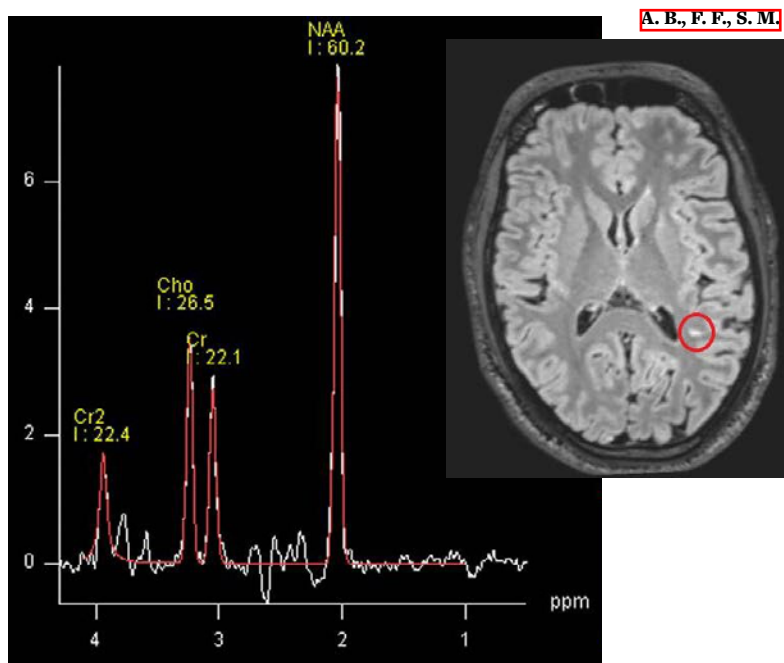
Signe de ces influences mutuelles entre corps et esprit, la Haute autorité de santé (HAS) recommande d'effectuer systématiquement un bilan biologique minimal dès qu'une pathologie psychiatrique est suspectée. Il se fonde notamment sur une analyse sanguine, pour détecter d'éventuels dysfonctionnements de la thyroïde, des reins ou du foie. Cependant, en l'état actuel des connaissances, ce bilan semble insuffisant : il ne comporte par exemple pas de mesure du taux de vitamine B12, dont la carence a causé les troubles de Nicolas, que nous avons décrits en ouverture de cet article. Heureusement, de plus en plus de psychiatres effectuent malgré tout cet examen et l'errance diagnostique de ce patient, qui remonte à une dizaine d'années, serait moins probable aujourd'hui. Le bilan minimal mériterait aussi d'être étoffé avec la recherche systématique d'une inflammation cérébrale.

Les nouvelles connaissances sur l'importance des facteurs biologiques n'influencent pas que le diagnostic, mais aussi le soin. Chez les patients atteints de trouble dépressif résistant, par exemple, on recommande déjà d'optimiser les taux d'hormones thyroïdiennes. Bien sûr, cela ne doit pas conduire à s'éloigner des méthodes psychothérapeutiques.

HISTOIRE D'UNE FAUSSE SCHIZOPHRÉNIE

« hypersignaux » atypiques (comme la zone blanche dans le cercle rouge, à droite), qui trahissaient une inflammation. Mais d'où venait cette inflammation ? Il a fallu une biopsie cérébrale (des chirurgiens ouvrent le crâne du patient afin de prélever un minuscule morceau de tissu) pour répondre et aboutir au diagnostic exact : Jean était victime d'une vascularite X, une forme très rare de maladie inflammatoire des vaisseaux sanguins.

Jean avait été diagnostiqué schizophrène, mais il présentait quelques symptômes inhabituels, comme des amnésies ou des troubles de l'équilibre. Il nous a donc été adressé pour des examens complémentaires. Nous avons effectué un large bilan : tests sanguins, ponction lombaire, spectro-IRM – qui permet de détecter certains éléments caractéristiques de perturbations métaboliques dans le cerveau (à gauche)... C'est finalement une IRM classique qui nous a mis sur la piste : l'image présentait des



Le soin mental ne fait que retrouver un chemin qu'il n'aurait jamais dû quitter : jusqu'en 1968, en France, la neurologie et la psychiatrie étaient exercées au sein d'une seule et même spécialité, la neuropsychiatrie. Après le clivage, la neurologie a pris en charge les pathologies où l'on détectait des lésions et la psychiatrie celles attribuées à des causes psychologiques. Mais on sait aujourd'hui que la frontière n'est pas si claire et que même quand aucune lésion n'est visible, de multiples facteurs biologiques peuvent perturber le cerveau à l'échelle moléculaire. Les différentes branches du soin mental ont donc tout intérêt à converger à nouveau, ou à interagir au maximum. Et à embarquer au passage quelques autres branches de la médecine, les recherches récentes ayant montré toute l'influence des systèmes hormonaux, digestif, cardiaque et immunitaire. L'esprit ne s'ancre pas seulement dans le cerveau, mais dans tout le corps. ■

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

L'ESSENTIEL

> La zooarchéologie par spectrométrie de masse, ou ZooMS, est une technique récente permettant, à partir d'un tout petit fragment d'os, d'identifier le groupe zoologique auquel appartient le fossile.

> Cette technique a été appliquée dès 2014 à des débris fossiles trouvés dans des sites

préhistoriques où des humains étaient présents. Il s'agissait en particulier de la grotte de Denisova, qui a été occupée par plusieurs espèces humaines.

> Grâce à ZooMS et à des techniques d'analyse complémentaires, les chercheurs ont fait de spectaculaires découvertes sur les interactions de ces espèces.

LES AUTEURS



THOMAS HIGHAM
directeur de l'unité
de datation au radiocarbone
et par accélérateur
à l'université d'Oxford,
au Royaume-Uni



KATERINA DOUKA
archéologue à l'institut
Max-Planck de science
de l'histoire humaine,
à Iéna, en Allemagne

Faire parler les vieux débris

Identifier le groupe animal auquel correspond un fragment d'os fossile : c'est ce que permet une technique récente dénommée ZooMS. Son application aux débris préhistoriques de la grotte de Denisova, en Sibérie, a contribué aux découvertes spectaculaires sur les humains qui s'y sont côtoyés il y a des dizaines de milliers d'années.



L'arrivée à Denisova est toujours un soulagement. Depuis Novossibirsk, 11 heures de voiture sur des routes accidentées traversant la steppe et les contreforts de l'Altaï sont nécessaires. Quand enfin, au détour d'un chemin de terre, apparaît le campement des chercheurs, on oublie aussitôt le long voyage : le paysage de rivières sauvages parcourant des vallées encaissées, parsemées de maisons traditionnelles en bois et survolées en permanence par des aigles royaux, a de quoi couper le souffle...

À quelques centaines de mètres du camp, une grotte calcaire domine la rivière Anouï. Elle nous fascine, car c'est là que nous allons participer à certaines des recherches les plus avancées sur les origines humaines. La grotte de Denisova est en effet au cœur d'une révolution technique qui promet de changer notre vision des interactions entre nos divers ancêtres paléolithiques. Une nouvelle technique, la zooarchéologie par spectroscopie de

masse ou ZooMS (acronyme de l'anglais *zooarchaeology by mass spectrometry*), démultiplie en effet nos données en permettant d'identifier la famille animale – au sens phylogénétique du terme – dont provient un fragment d'os. Jusqu'à présent, les nombreux microvestiges de ce type ne semblaient pas pouvoir apporter d'information. Mais l'analyse des molécules de collagène qu'ils recèlent change la donne. Nous sommes par exemple désormais capables de déterminer si un fragment osseux de Denisova appartient ou non à la famille des hominidés, c'est-à-dire des humains et des grands singes. Quand, en outre, on parvient à extraire de l'ADN de ce fragment et à l'analyser, on peut préciser l'espèce à laquelle il appartient.

Notre espèce, *Homo sapiens*, est sortie d'Afrique il y a plusieurs centaines de milliers d'années. Au cours de leur expansion en Europe et en Asie, nos ancêtres *sapiens* ont rencontré d'autres humains – des Néandertaliens en particulier – puis les ont côtoyés pendant plusieurs millénaires, alors que ces cousins se raréfiaient, avant de disparaître. Aujourd'hui, >



Les petits fragments osseux que l'on découvre en masse dans les grottes préhistoriques proviennent parfois d'humains. Comment les reconnaître ?

➤ nous savons avec certitude qu'*H. sapiens* a croisé ces autres espèces humaines au cours de la transition entre le Paléolithique moyen (350 000 à 45 000 ans avant le présent) et le Paléolithique supérieur (de 45 000 à 12 000 ans avant le présent). Comment? Parce que nous portons leurs gènes en nous.

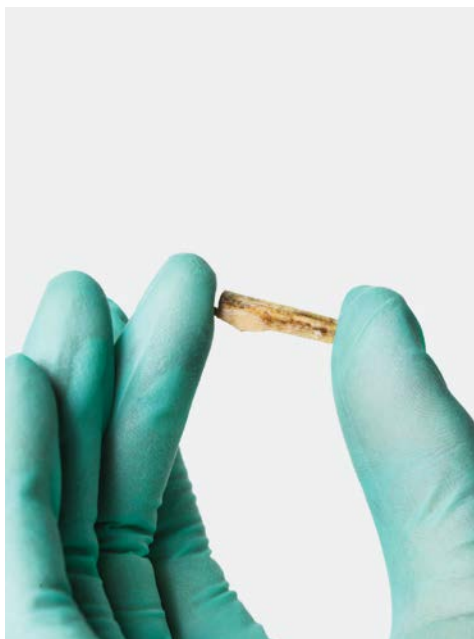
Ce que, en revanche, nous ignorons et aimerions savoir, c'est où et quand nos divers ancêtres se sont croisés, avec quelle fréquence et s'ils se sont influencés culturellement. Certes, nous disposons de nombreux sites archéologiques regorgeant d'outils lithiques et d'autres artefacts datant de la période de transition. Pour autant, la plupart – et c'est le cas de la grotte de Denisova – n'ont pas livré de fossiles humains assez complets pour qu'il soit possible de leur assigner une espèce sur la seule base de leurs caractères osseux. Cette limite a malheureusement empêché de déterminer quelles espèces ont fait quoi, où et quand. Mais c'est en train de changer.

La datation directe d'un fossile nécessite de sacrifier une partie de l'os. Les conservateurs de musées rechignent donc à donner en datation les os relativement complets que contiennent leurs collections. Ils n'ont pas les mêmes réserves s'agissant de débris. Quand des os fossiles sont trouvés en association avec des objets – comme à Denisova et dans bien d'autres sites –, il est particulièrement intéressant de les dater directement. Pour nombre de chercheurs, l'usage d'ornements et d'autres objets symboliques, que l'on tend à considérer comme un trait cognitif moderne, serait propre à *H. sapiens*. Mais certains sont d'avis que les Néandertaliens, et éventuellement d'autres espèces humaines, ont aussi eu ce genre de comportements symboliques. Ces chercheurs envisagent même que ces humains dits archaïques auraient transmis une partie de leurs traditions à *H. sapiens*.

Cet exemple illustre l'importance d'identifier et de dater les fragments osseux trouvés dans les grottes, afin de restituer de façon assez détaillée le cadre chronologique des sites préhistoriques. C'est encore plus vrai s'agissant des sites de la période de transition.

LA GROTTE DE DENISOVA, SITE D'IMPORTANCE MAJEURE

Les archéologues russes fouillent la grotte de Denisova depuis les années 1980. Ce site majeur n'est toutefois devenu vraiment célèbre qu'après 2010. Cette année-là, autour de Johannes Krause, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig, une équipe de paléogénéticiens est parvenue à extraire et à séquencer l'ADN de Denisova 3, un petit morceau de phalange découvert dans la grotte sibérienne en 2008. Or cet ADN a révélé qu'il appartenait à une espèce humaine



Ce fragment osseux provenant de la grotte de Denisova est le plus récent spécimen à avoir été identifié comme étant celui d'un hominidé grâce à la technique ZooMS.

inconnue, plus proche des Néandertaliens que de nous. La phalange, détruite par l'extraction d'ADN, était celle d'une petite fille. Longtemps nommée «femme X», cette petite fille faisait partie d'une population disparue, les Denisoviens. Depuis cette découverte spectaculaire, on a mis au jour plusieurs dents et os humains, qui se sont révélés soit d'enisoviens, soit néandertaliens.

Ces découvertes illustrent le grand intérêt des données que l'on extrait désormais des (fragments de) fossiles grâce aux techniques paléobiologiques modernes, dont la ZooMS. Ces techniques sont non seulement aptes à révéler des espèces humaines ignorées, mais renseignent aussi sur leurs interactions avec *H. sapiens*. La paléogénétique, par exemple, nous a appris qu'au cours des 100 000 dernières années, les Néandertaliens se sont métissés au moins trois fois avec nos ancêtres *sapiens*. Nous avons également mis en évidence que les Denisoviens se sont métissés non seulement avec les Néandertaliens, mais aussi avec nos ancêtres *sapiens*.

C'est ainsi que l'ancienne vision d'un *H. sapiens* sortant d'Afrique et éliminant tous les autres humains rencontrés sur son chemin est désormais écartée, et remplacée par un scénario bien plus compliqué d'échanges génétiques entre groupes préhistoriques.

Toutefois, la plupart des fossiles découverts à Denisova sont si incomplets que nous ne savons discriminer ceux qui sont humains; les strates du site sont en outre notoirement difficiles à dater. C'est pourquoi, il y a six ans, en tant que spécialistes de la datation, nous avons voulu contribuer aux recherches sur Denisova.

La datation de vestiges du Paléolithique moyen et du Paléolithique supérieur est en

HOMINIDÉS ET HOMININÉS

Ici, le terme d'hominidés regroupe la lignée des humains et des grands singes (humains, orangs-outans, chimpanzés, gorilles et formes disparues). Le terme d'homininés désigne la lignée des formes humaines et préhumaines depuis le dernier ancêtre commun avec les chimpanzés.

À Denisova, tous les vestiges d'hominidés sont minuscules

effet d'autant plus importante que les outils pouvant être associés à des périodes précises manquent dans les sites préhistoriques. Nous avons donc recherché un moyen systématique d'obtenir des chronologies fiables pour Denisova et d'autres sites.

En 2014, lors d'une réunion de l'équipe de Denisova, nous avons eu l'idée d'une nouvelle approche à même de donner une vision nuancée des échanges entre *H. sapiens*, Néandertaliens et Denisoviens. À Denisova, tous les vestiges humains sont minuscules: ils ne mesurent généralement que de 3 à 5 centimètres. Le morceau de phalange de la femme X, par exemple, avait la taille d'une lentille et pesait moins de 40 milligrammes! Beaucoup des vestiges osseux du site ont en effet été réduits en petits morceaux par les prédateurs tels que les hyènes, qui aiment mâchouiller des os quand elles allaitent.

Depuis 2008, plus de 135 000 ossements divers ont été mis au jour à Denisova, mais 95% d'entre eux sont trop fragmentaires pour être identifiés visuellement. En revanche, dans ces fragments, des macromolécules biologiques, dont de l'ADN, sont remarquablement

préservées, grâce aux températures négatives qui règnent toute l'année. De fait, les deux génomes complets les plus anciens jamais retrouvés proviennent tous deux de fossiles de Denisova.

D'où un défi essentiel: construire un crible capable d'identifier des fragments humains perdus dans un amas de milliers de petits os, comme une aiguille l'est dans une botte de foin. Y parvenir signifie aussi obtenir plus de nouvelles données génétiques et chronologiques, voire, comme cela est déjà arrivé, identifier une nouvelle espèce. C'est en menant ces réflexions que nous avons compris que la ZooMS était la bonne technique pour atteindre nos objectifs.

UNE TECHNIQUE D'ANALYSE DU COLLAGÈNE DES OS

La zooarchéologie par spectroscopie de masse pourrait aussi être nommée «prise de l'empreinte peptidique du collagène». Grâce à cette technique, les chercheurs peuvent identifier à partir des protéines d'un os le groupe taxonomique (la famille d'espèces) auquel appartient l'individu dont l'os provient. La taxonomie consiste en effet à classer les organismes vivants en «taxons», c'est-à-dire en groupes définis par une série de traits communs. L'un de ces traits est la composition du collagène.

Rappelons que les collagènes sont des protéines particulières, c'est-à-dire des macromolécules polypeptidiques (les peptides sont des polymères d'acides aminés reliés entre eux par des liaisons peptidiques), qui jouent dans les organismes animaux un important rôle structural. Le collagène des os, plus particulièrement, est constitué de centaines de peptides, qui varient légèrement

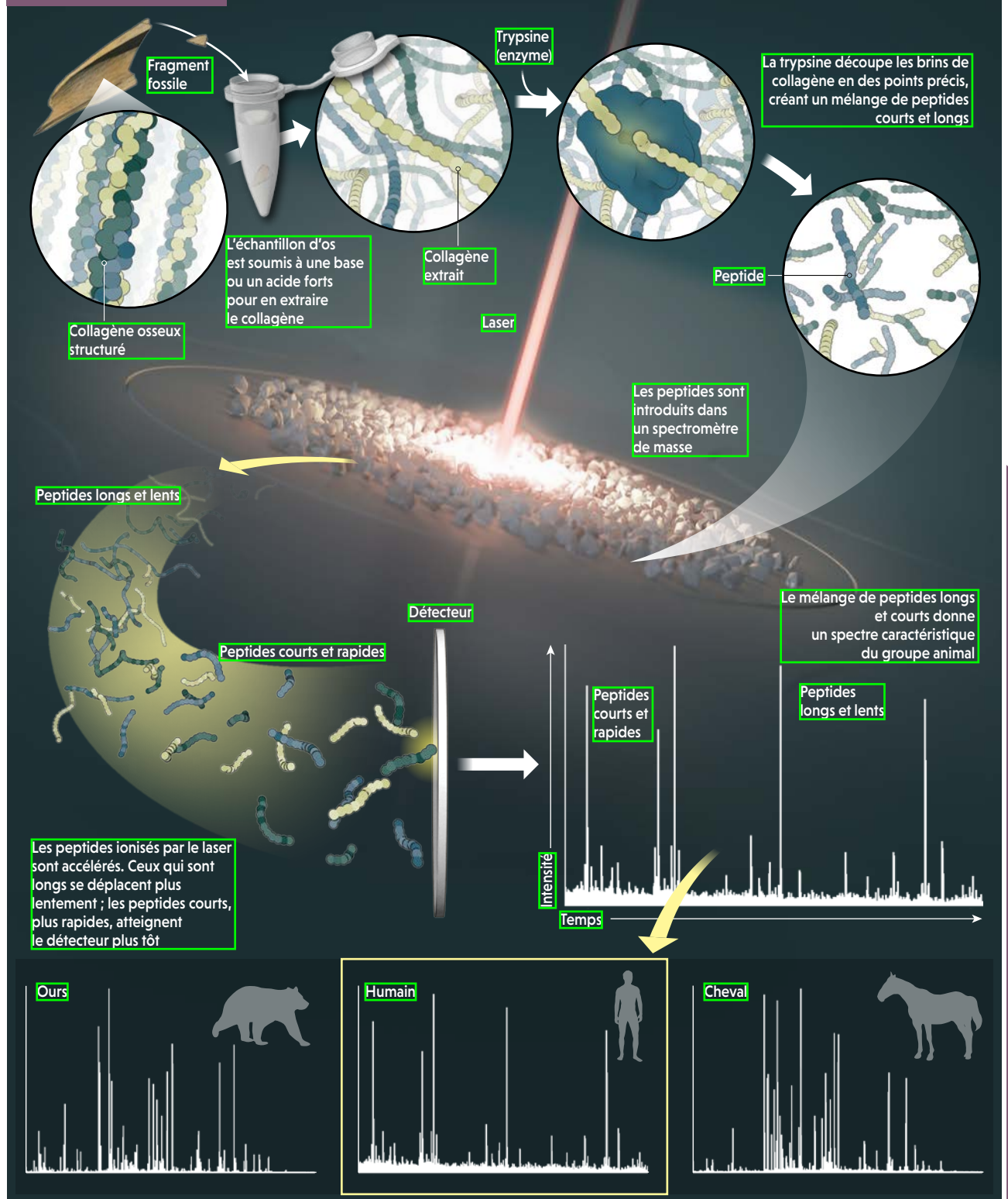


Les deux auteurs et des collègues étudient comment prélever au mieux des échantillons dans les strates de la grotte de Denisova, en vue de les analyser par ZooMS et de les dater par le radiocarbone.

MAIS À QUI APPARTIENT CET OS?

ZooMS assigne une famille zoologique ou un genre à un fragment osseux. La technique consiste à analyser le collagène osseux, un type de protéine qui, dans un os, se conserve longtemps. Une enzyme découpe le collagène en ses composants, les chaînes de peptides. Un laser

ionise ensuite les peptides, ce qui permet de les accélérer au sein d'un spectromètre de masse et de les détecter. La série constituée par les temps d'arrivée sur le détecteur des divers peptides, temps qui dépendent de leurs masses, caractérise le collagène et la famille animale dont il provient.



➤ d'une famille animale à l'autre. À chacune correspond donc une certaine signature peptidique du collagène osseux. En comparant la composition d'un collagène osseux à celles consignées dans une bibliothèque de compositions peptidiques associées à des animaux connus, il est donc possible d'assigner à un énigmatique fragment osseux une famille, un genre, voire une espèce.

La ZooMS a été mise au point par Michael Buckley, qui est aujourd'hui à l'université de Manchester, et par Matthew Collins, de l'université d'York. Au cours de la dernière décennie, cette technique a démontré son efficacité dans l'identification des os animaux trouvés dans les sites archéologiques. Elle est relativement bon marché, puisqu'elle coûte 5 à 10 dollars par échantillon. Elle a aussi l'avantage d'être peu destructive, puisque seulement de 10 à 20 milligrammes d'os par analyse sont nécessaires. Autre atout : sa rapidité – une seule personne peut traiter des centaines d'ossements par semaine.

L'espèce dont il provient. Lors de notre réunion de 2014 à Denisova, était présent Svante Pääbo, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste. Ce paléogénéticien est célèbre pour avoir lancé le projet *Génome de Néandertal*, qui a révélé non seulement le génome d'*Homo neanderthalensis*, mais aussi celui des Dénisoviens. Nous ne connaissions alors Svante Pääbo que de réputation, et nous voulions avoir son avis sur notre idée de trier des fragments osseux à l'aide de ZooMS, voire le convaincre de nous aider. Or il a décidé immédiatement de participer.

DES MILLIERS DE FRAGMENTS D'OS À ANALYSER

Nous avons aussi discuté de notre projet avec Anatoly Derevianko, de l'Académie russe des sciences, qui supervise le travail scientifique mené à Denisova, et avec Michael Shunkov, qui y dirige les fouilles. Tous deux se sont aussi déclarés intéressés. C'est ainsi que, dès 2014, nous avons pu commencer à échantillonner plusieurs milliers de petits fragments osseux fraîchement extraits d'une strate et censés être inexploitable (voir les photos page 56).

Le travail devait en principe pouvoir se faire vite. Dans la pratique, il était énorme, car il nous a fallu extraire soigneusement de chaque fragment une minuscule quantité de poudre d'os, sans rien toucher et en prenant d'énormes précautions afin de nous assurer que l'ADN ancien contenu dans l'échantillon ne serait pas contaminé par de l'ADN contemporain. Samantha Brown, l'une de nos étudiantes, s'est attelée à cette minutieuse tâche dans le cadre de son mémoire de master, en y consacrant d'innombrables heures au sein de notre laboratoire à l'université d'Oxford.

Le père de la ZooMS, Michael Buckley, nous a aussi aidés. Après avoir rassemblé 700 à 800 fragments osseux, Samantha Brown s'est rendue dans son laboratoire afin d'y préparer ces échantillons et de les analyser. Les résultats étaient intéressants : nous avions affaire à des os de mammouths, de hyènes, de chevaux, de rennes, de rhinocéros à poils laineux, bref à tout le bestiaire du film d'animation *L'Âge de glace* ; mais d'os d'hominidé, point !

Décus, nous avons toutefois réessayé avec un deuxième lot de fragments. Un soir de l'été 2015, Michael Buckley nous écrivit : le fragment DC1227 portait la signature peptidique des hominidés. Nous avons enfin trouvé l'aiguille dans la botte de foin. Apparemment, notre idée folle s'était concrétisée !

Tôt le lendemain, nous allâmes rechercher DC1227 dans nos archives. Mauvaise surprise : sa taille de seulement 25 millimètres ne laissait pas beaucoup d'os à prélever pour la datation et le séquençage. Nous avons cependant gardé

➤



Avec le fragment DC1227, les chercheurs ont enfin trouvé l'aiguille dans la botte de foin



En 2014, à notre connaissance, personne n'avait employé la ZooMS pour identifier des os humains. Étant donné que cette technique peut s'appliquer même à de tout petits fragments, nous pensions qu'il fallait essayer. À Denisova, comme nous l'avons indiqué, la préservation du collagène osseux et de l'ADN est sans égale. L'utilisation de la ZooMS sur ce site nous semblait donc prometteuse.

Nous savions toutefois que la méthode ne permet pas d'identifier l'espèce. En effet, les signatures peptidiques du collagène de l'espèce humaine actuelle et des grands singes se ressemblent trop. Toutefois, comme aucun grand singe ne vivait en Sibérie au Paléolithique, l'attribution d'un fragment osseux trouvé à Denisova à la famille des hominidés suffit à le déclarer humain.

Une fois le caractère humain d'un fragment établi, le séquençage et l'analyse de l'ADN qu'il contient devaient permettre d'identifier

Esperance, l'ADN étant très bien conservé à Denisova. Avant que Samantha n'emporte le fragment DC1227 à Leipzig dans le laboratoire de Svante Pääbo pour extraction et analyse de l'ADN, nous avons photographié en haute résolution cet os, l'avons scanné aux rayons X et extrait des échantillons en vue de le dater et d'analyser sa composition isotopique.

Quelques semaines plus tard, les résultats de la datation sont arrivés: l'absence de tout carbone radioactif dans l'échantillon signifiait que ce petit bout d'os avait plus de 50000 ans. Puis nous avons appris de Svante Pääbo que son ADN mitochondrial – l'ADN contenu dans les mitochondries (des organites des cellules), qui est transmis par la mère – indiquait que la mère de l'individu était néandertalienne.

L'équipe de Svante Pääbo a aussitôt entrepris d'extraire de DC1227, appartenant à un individu que l'on a désormais dénommé « Denisova 11 » ou « Denny », de l'ADN nucléaire (ADN des noyaux des cellules). Pendant qu'elle se livrait à cette tentative hautement technique et délicate d'obtention de cet ADN tellement plus riche en informations que l'ADN mitochondrial, nous avons décidé de tester notre approche sur un autre site.

ZOO MS SUR LA GROTTA DE VINDIJA

La grotte de Vindija, en Croatie, est un site clé pour comprendre le sort des Néandertaliens tardifs en Europe. Les datations par le radiocarbone ont longtemps suggéré que certains d'entre eux étaient encore présents en Europe il y a quelque 30000 ans. Cela laissait donc ouverte la possibilité d'une très longue cohabitation entre *H. neanderthalensis* et *H. sapiens*, puisque ce dernier a pénétré en Europe il y a quelque 43000 ans. Une coexistence aussi longue suggérait que, plutôt que d'être acculés à l'extinction par les humains modernes, les Néandertaliens ont été assimilés au sein de leur population.

Pendant que nous réexaminions la chronologie de Vindija, nous avons pensé qu'il pourrait être intéressant d'étudier avec ZooMS les os non identifiés du site. Les recherches déjà menées sur les os les plus complets de Vindija avaient montré que 80% d'entre eux provenaient d'ours des cavernes. Nous ne nous attendions donc pas à une faune aussi variée que celle de Denisova. C'est Cara Kubiak, une autre de nos étudiantes, qui a pris le projet en charge.

Le 28^e fragment des 383 que nous analysons nous fit la surprise de révéler une signature peptidique hominidée. L'étude paléogénétique que l'équipe de Svante Pääbo a ensuite menée a établi que le fragment correspondant appartenait à un Néandertalien. Curieusement, cet os d'environ 7 centimètres



A gauche: un échantillon de 20 milligrammes doit être prélevé dans chaque minuscule fragment, afin de pouvoir en établir la signature peptidique avec ZooMS. À droite: des échantillons sont en cours de préparation afin de les dater par le radiocarbone.

de long portait des entailles et d'autres traces d'intervention humaine. Les os néandertaliens présentent parfois ces marques, qui pourraient bien être des traces de boucherie, donc de cannibalisme.

Noté Vi-*28, ce spécimen s'est révélé jouer un rôle majeur dans nos travaux chronologiques. Dans le passé, les archéologues et les préparateurs croates avaient traité les os de Vindija avec des produits conservateurs afin de les protéger. Malheureusement, cette pratique avait ajouté du carbone aux os, ce qui a rendu très difficile leur datation par le radiocarbone. Mais comme on le croyait non humain, Vi-*28 n'avait pas été traité ainsi. Son âge exact pouvait donc être déterminé. La méthode du radiocarbone nous a ainsi indiqué que Vi-*28 appartenait à un Néandertalien qui avait vécu il y a plus de 47000 ans.

Publiée en 2017 avec les dates obtenues pour d'autres Néandertaliens, cette découverte montre qu'*H. neanderthalensis* a disparu de Vindija il y a plus de 40000 ans, donc avant l'arrivée d'*H. sapiens* sur le site. Les précédentes datations, qui indiquaient 30000 ans, étaient donc fausses, à cause du carbone ajouté aux os par le traitement de conservation et qui n'avait pu être retiré correctement. ZooMS, une fois de plus, avait prouvé son utilité.

D'autres équipes ont aussi obtenu de très bons résultats avec ZooMS. En 2016, Frido Welker, aujourd'hui au Muséum d'histoire



naturelle du Danemark, et ses collègues ont utilisé la technique pour identifier 28 fossiles d'homininés parmi les fragments d'os d'espèce indéterminée de la grotte du Renne, en Bourgogne. Il y a plusieurs décennies, des chercheurs y ont en effet découvert des os néandertaliens en association avec un ensemble d'objets étonnamment élaborés, dont des outils en os ainsi que des pendentifs et d'autres ornements corporels, autant d'artefacts de la culture châtelperronienne censée avoir marqué la transition entre le Paléolithique moyen et le Paléolithique supérieur en Europe occidentale.

Cette découverte allait à l'encontre de l'idée ancienne selon laquelle seul *H. sapiens* avait pu produire de tels objets. La controverse est allée bon train, entre ceux qui croyaient les Néandertaliens vraiment associés à ces objets perfectionnés et ceux qui avançaient qu'une perturbation des strates archéologiques du site était à l'origine d'un mélange dans les mêmes couches d'os néandertaliens et d'objets plus récents dus à *H. sapiens*.

Les 28 fragments osseux que Frido Welker et ses collègues ont identifiés comme humains grâce à ZooMS venaient tous clairement de la même couche que les outils et ornements perfectionnés. Quand ils ont séquencé les os, les résultats étaient sans équivoque: les spécimens étaient néandertaliens et non *sapiens*. Ainsi, ZooMS a clairement mené à la conclusion que l'industrie châtelperronienne et d'autres industries de la période de transition étaient bien le fait de Néandertaliens: les capacités cognitives de ces derniers étaient supérieures à l'idée que l'on s'en faisait.

DE MÈRE NÉANDERTALIENNE ET DE PÈRE DÉNISOVIE

Pendant toute la durée de nos travaux à Vindija, nous avons continué à analyser des échantillons de Denisova dans l'espoir que nous pourrions ajouter au corpus de «nouveaux» fossiles humains. Nos efforts ont payé. Nous avons découvert deux fragments supplémentaires associés à des hominidés: DC3573, qui s'est révélé appartenir à un Néandertalien d'il y a plus de 50000 ans, et DC3758, un os vieux de 46000 ans dans lequel l'ADN ancien n'avait malheureusement pas été préservé. Plus de 5000 fragments osseux nous ont à ce jour livré un total de 5 os d'homininés qui, sans ZooMS, seraient probablement restés à jamais ignorés.

Toutefois, le résultat le plus passionnant dû à cette technique devait encore venir. En mai 2017, nous nous sommes rendus à l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste afin de rencontrer Matthias Meyer et Janet Kelso, des membres éminents du laboratoire de Svante Pääbo. La rencontre était

organisée afin de nous informer sur ce qu'il en était de Denisova 11. L'extraction d'ADN nucléaire s'était-elle révélée possible? Avait-elle livré des informations sur cet individu?

Il n'arrive pas souvent en science d'apprendre quelque chose de renversant, mais c'est exactement ce que Matthias Meyer et Janet Kelso nous réservaient. L'ADN nucléaire, nous ont-ils appris, était curieusement composé: la moitié correspondait à un Néandertalien, et l'autre moitié semblait provenir d'un Denisovien. Ils pensaient que Denisova 11 était un hybride à 50/50. Pour exclure toute possibilité d'erreur, l'équipe était en train de refaire les tests pour vérifier cet extraordinaire résultat.

Quelques mois plus tard, les chercheurs ont confirmé ce résultat initial. L'ADN mitochondrial ne nous avait révélé que la moitié du tableau: l'individu humain que nous avons identifié était bien une métisse dont la mère était néandertalienne et le père denisovien – en d'autres termes, un hybride de première génération, comme disent les généticiens. L'équipe de Denisova a publié cette incroyable découverte en septembre 2018, dans la revue *Nature*.

Nous savons donc grâce à l'ADN que Denisova 11 était un individu féminin qui vécut il y a entre 90000 et 100000 ans. Une analyse de la densité osseuse du fragment à l'aide de notre scanner a permis à notre collègue Bence Viola, de l'université de Toronto, d'estimer que Denisova 11 était âgée d'au moins 13 ans à sa mort. Son père denisovien avait lui-même un lointain ancêtre néandertalien, qui vécut plusieurs centaines de générations avant lui.

Nous ne pourrions bien sûr jamais savoir comment ces unions mixtes se produisaient pendant la Préhistoire, mais nous savons avec certitude qu'elles ont bien eu lieu. Nous ne pouvons pas davantage établir de quelle façon Denisova 11 est morte, mais nous savons que ses restes ont probablement été déposés dans les sédiments de la grotte par un prédateur, une hyène peut-être.

Denisova 11 est-elle morte parmi les siens, qui l'ont ensuite enterrée lors d'une cérémonie, pour être ensuite déterrée par une hyène? Ou bien a-t-elle été tuée par un prédateur? Pendant des dizaines de millénaires, ce minuscule morceau de son corps est resté intact dans l'obscurité de la grotte, et il aurait bien pu y rester très longtemps encore. Les techniques d'avant-garde de la zooarchéologie par spectroscopie de masse, de la spectrométrie de masse par accélérateur appliquée à la datation et du séquençage de l'ADN fossile ont permis d'établir quelques éléments de sa vie. Ce succès nous porte à espérer que ZooMS nous livrera encore de très nombreux autres secrets cachés dans les ossements. ■

BIBLIOGRAPHIE

V. Slon *et al.*, **The genome of the offspring of a Neanderthal mother and a Denisovan father**, *Nature*, vol. 561, pp. 113-116, 2018.

T. Devière *et al.*, **Direct dating of Neanderthal remains from the site of Vindija Cave and implications for the Middle to Upper Paleolithic transition**, *PNAS*, vol. 114 (40), pp. 10606-10611, 2017.

F. Welker *et al.*, **Palaeoproteomic evidence identifies archaic hominins associated with the Châtelperronian at the Grotte du Renne**, *PNAS*, vol. 113 (40), pp. 11162-11167, 2016.

S. Brown *et al.*, **Identification of a new hominin bone from Denisova Cave, Siberia using collagen fingerprinting and mitochondrial DNA analysis**, *Scientific Reports*, vol. 6, article 23559, 2016.

L'ESSENTIEL

> Les premières observations fiables de nanobulles stables, formées sur une surface, datent de 2000.

> On s'attendrait à ce que des bulles de cette taille aient une pression interne très élevée, qui aurait dû les faire disparaître en quelques microsecondes.

> Leur stabilité s'explique par l'accrochage de leur contour sur la surface.

> Les nanogouttes de surface sont des systèmes analogues. Les nanobulles et nanogouttes de surface interviennent dans de nombreux processus, notamment en génie chimique.

L'AUTEUR



DETLEF LOHSE
professeur de physique
des fluides à l'université
de Twente, aux Pays-Bas,
lauréat du prix Balzan en 2018

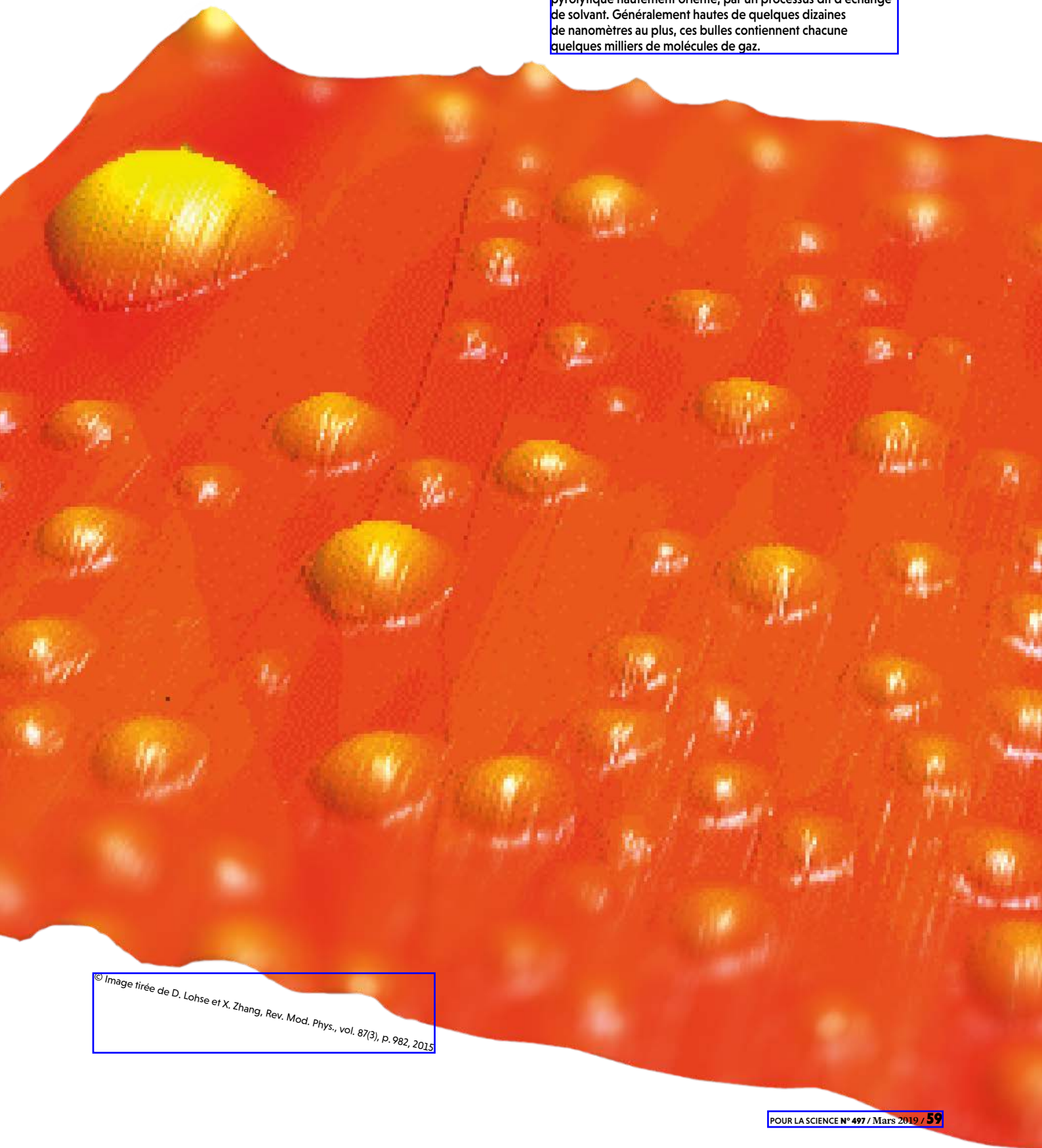
Le paradoxe des nanobulles

Depuis près de vingt ans, on sait que des bulles de taille nanométrique accrochées à une surface ont une durée de vie de plusieurs jours. Or les physiciens calculaient qu'elles devraient se dissoudre en quelques microsecondes... : une énigme qu'ils n'ont résolue que récemment.

On peut observer quotidiennement la danse hypnotique de bulles d'air dans de l'eau ou un autre liquide. Mais ces objets familiers sont souvent éphémères : après s'être formées, les bulles remontent rapidement à la surface du liquide, où elles éclatent. Certaines d'entre elles, cependant, restent accrochées à une surface et s'y maintiennent longtemps, ce qui est plus intrigant.

Voici une façon simple d'en produire. Remplissez un verre avec de l'eau froide du robinet et laissez-le reposer dans une pièce chaude : de petites bulles d'air se forment sur les parois internes du verre (voir la figure page 60). Pourquoi ces bulles naissent-elles ? L'eau du robinet est généralement saturée d'air, et les gaz se dissolvent beaucoup mieux dans l'eau froide que dans l'eau chaude. Or dans le verre, l'eau froide du robinet se réchauffe peu à peu pour atteindre la température ambiante. Par conséquent, la solubilité du gaz diminue et l'eau devient sursaturée en air : des bulles d'air apparaissent alors sur les parois du verre. Selon la taille du récipient, ces bulles d'air ont une durée de vie qui peut atteindre plusieurs jours. 

Cette image obtenue par microscopie à force atomique montre des nanobulles qui se sont formées sur une surface de graphite pyrolytique hautement orienté, par un processus dit d'échange de solvant. Généralement hautes de quelques dizaines de nanomètres au plus, ces bulles contiennent chacune quelques milliers de molécules de gaz.



© Image tirée de D. Lohse et X. Zhang, Rev. Mod. Phys., vol. 87(3), p. 982, 2015

Les bulles qui apparaissent sur la paroi du verre sont plutôt petites, mais on peut se demander quelle est leur taille minimale. Est-il possible de créer ainsi des bulles nanométriques, c'est-à-dire dont le diamètre est de quelques milliardièmes de mètre? Les physiciens ont longtemps pensé que non.

Pourquoi? La raison est assez simple: selon une loi physique bien connue, plus les bulles sont petites, plus leur pression interne est élevée par rapport à la pression externe. Plus précisément, la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la bulle, que l'on nomme pression de Laplace, est égale à $2\sigma/R$, où σ désigne la tension superficielle du liquide et R est le rayon de la bulle (voir l'encadré page ci-contre). Il s'ensuit que pour une toute petite bulle, sa pression interne est si élevée qu'une partie du gaz qui la remplit diffuse dans le liquide environnant et s'y dissout. De ce fait, la bulle rétrécit, ce qui fait encore augmenter la pression interne, et ainsi de suite: la bulle devient de plus en plus petite et finit par disparaître.



© D. Lohse

Dans un verre où l'on verse de l'eau froide du robinet et qu'on a laissé reposer dans un endroit où la température est plus douce, des bulles d'air se forment sur les parois. Le phénomène est dû au fait que la solubilité de l'air dans l'eau diminue quand la température augmente: des bulles naissent quand l'eau devient sursaturée en air.

UNE STABILITÉ INATTENDUE

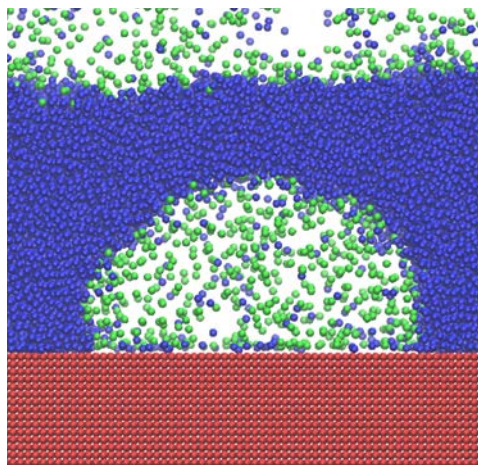
Les équations d'Epstein-Plesset (du nom des physiciens américains Paul Epstein et Milton Plesset qui les ont étudiées en 1950) décrivent la dynamique de cette diffusion du gaz dans le liquide. Elles permettent ainsi de calculer la durée de vie d'une bulle dans l'eau. On trouve qu'une bulle d'air mesurant 10 nanomètres de diamètre devrait se dissoudre en un millionième de seconde. Et des bulles plus petites devraient disparaître encore plus rapidement...

Pourtant, les bulles nanométriques – les nanobulles – ont souvent une durée de vie beaucoup plus longue, assez pour être observables dans les expériences. Les premières tentatives d'observation de nanobulles, qui datent des années 1990, ont laissé sceptiques la plupart des spécialistes. Cependant, en 2000, deux équipes, l'une (Shi-Tao Lou et ses collègues) à l'Institut de recherches nucléaires de Shanghai, en Chine, l'autre (Naoyuki Ishida et ses collègues) à l'université de Kyoto, au Japon, ont publié des images, obtenues par microscopie à force atomique, de ce qui semblait bien être des nanobulles de surface. Depuis, grâce à l'amélioration des techniques expérimentales, d'autres travaux ont confirmé l'existence de ces structures (voir la figure page 58) et montré que les nanobulles peuvent subsister plusieurs jours sur une surface – soit une durée supérieure de plus de 11 ordres de grandeur à celle prédite par le calcul d'Epstein-Plesset!

Face à un aussi grand désaccord entre les observations et la théorie, il faut aborder le problème sous un nouvel angle. En particulier, la

confrontation avec des simulations numériques du phénomène peut se révéler utile. C'est ce que nous avons fait en 2012. Nous avons effectué des simulations de dynamique moléculaire de nanobulles posées sur une surface (voir la figure ci-dessous). Dans une telle simulation, l'ordinateur calcule le mouvement de chacune des molécules, celles-ci étant en nombre limité pour que le calcul soit faisable. Les nanobulles simulées se dissolvaient en moins d'une microseconde, ce qui était en bon accord avec le modèle théorique, mais très éloigné de la réalité!

Ainsi, depuis le début des années 2000, le paradoxe posé par la stabilité des nanobulles



Des simulations de dynamique moléculaire réalisées par l'auteur et ses collègues, comme celle représentée ici, indiquaient que les nanobulles devaient se dissoudre dans le liquide en quelques microsecondes, comme le prévoyaient les calculs théoriques mais contrairement à ce que l'on observait. Ces simulations ne prenaient pas en compte l'accrochage du contour de la bulle sur la surface, phénomène qui s'est révélé jouer un rôle crucial.

a intrigué les physiciens. Comme nous allons le voir, il n'a été résolu que récemment, vers 2015. Il s'agit d'une avancée importante, d'autant que l'intérêt d'une bonne compréhension de la physique des nanobulles n'est pas qu'académique : des bulles ou des gouttes nanométriques se forment et interviennent dans un grand nombre de processus naturels ou industriels, et j'en donnerai plus loin quelques exemples.

Avant d'expliquer comment le paradoxe de la stabilité des nanobulles a été résolu, précisons comment on produit ces objets en laboratoire. La façon la plus simple de les obtenir est le procédé dit d'échange de solvant. Typiquement, on recouvre une surface solide (généralement hydrophobe) avec de l'éthanol (alcool) saturé en gaz, puis on remplace ce très bon solvant en le chassant avec un autre solvant (de l'eau par exemple) dans lequel le gaz est moins soluble. Le mélange d'éthanol et d'eau qui se forme localement est alors sursaturé en gaz, ce qui entraîne la nucléation de bulles sur la surface.

Venons-en à présent au problème de la stabilité. Dans un premier temps, les physiciens ont tenté d'expliquer la persistance des nanobulles de surface par la présence d'impuretés ou de « salissures ». Une hypothèse particulièrement populaire était celle d'une

stabilisation par des agents tensioactifs (qui diminuent la tension superficielle), constitués par les inévitables et minuscules particules qui subsistent même au plus haut niveau de propreté et qui s'accumuleraient à la surface des bulles. Mais cette hypothèse a fini par être écartée pour diverses raisons.

Alors, que se passe-t-il ? La clé de la stabilité des nanobulles se situe au niveau de leur angle de contact avec la surface solide (voir la figure page 62). Cette grandeur est une autre particularité intrigante des nanobulles. En effet, l'angle de contact des bulles de taille ordinaire garde une valeur constante, qui dépend uniquement des tensions superficielles des interfaces liquide-gaz, liquide-solide et solide-gaz. C'est la loi classique dite de Young-Dupré. Or les mesures effectuées sur des nanobulles de surface ont montré que leur angle de contact (mesuré entre la surface et le côté interne de la bulle) est bien plus petit que l'angle de Young et que, de plus, il varie avec la taille de la nanobulle.

L'ACCROCHAGE SUR LA SURFACE JOUE UN RÔLE CLÉ

En 2013, Xuehua Zhang, de l'université de Melbourne, en Australie, et trois de ses collègues ont réalisé des expériences qui ont permis de franchir un pas considérable dans la résolution de cette question et de celle de la stabilité. Ces chercheurs ont constaté que les nanobulles placées dans de l'eau sous-saturée en gaz se dissolvent non pas *via* une diminution de leur taille latérale (le diamètre du disque que la bulle occupe sur la surface), mais *via* une diminution de leur angle de contact (voir la figure page 64). Autrement dit, la ligne de contact solide-liquide-gaz de la bulle reste bloquée, et la diminution de la quantité de gaz contenue dans la bulle se traduit par un aplatissement de celle-ci, et donc par une augmentation du rayon de courbure.

Cet accrochage de la nanobulle, qui est dû aux minuscules hétérogénéités physiques ou chimiques de la surface, change radicalement les choses. En effet, la pression au sein de la bulle, inversement proportionnelle à son rayon de courbure, décroît alors vers zéro au fur et à mesure que le gaz se dissout dans le liquide. Ainsi, la pression interne n'augmente plus, mais au contraire diminue, ce qui réduit la vitesse de dissolution du gaz et rend la bulle plus stable.

En effet, en 2015, en généralisant le calcul d'Epstein-Plesset, Xuehua Zhang et moi avons pu calculer avec précision la dynamique de diffusion d'une nanobulle en tenant compte de son accrochage sur la surface. Nos calculs montrent que, dans un liquide qui n'est pas saturé en gaz, l'angle de contact ne peut que diminuer avec le temps, jusqu'à ce que la bulle disparaisse.

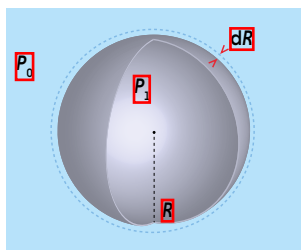
TENSION SUPERFICIELLE ET PRESSION DE LAPLACE

En raison des interactions des molécules, un liquide tend à présenter la plus petite surface possible. Sa surface se comporte comme si elle était élastique, et la tension superficielle est la grandeur qui caractérise cette élasticité : elle correspond à l'énergie qu'il faut fournir pour accroître la surface d'une unité d'aire. Elle dépend du liquide et du milieu situé de l'autre côté de l'interface.

Une conséquence de la tension superficielle est que, à l'équilibre, les gouttes ou les bulles sont sphériques : la sphère est la forme qui, pour un volume donné, a la superficie minimale (pour une goutte ou une bulle accrochée à une surface, il s'agira d'une calotte sphérique).

Une autre conséquence de la tension superficielle est qu'à l'intérieur d'une bulle règne une pression plus élevée que dans le liquide environnant. Pour une bulle sphérique, la différence de pression, appelée pression de Laplace, est égale à $2\sigma/R$ où σ est la tension superficielle et R le rayon de la bulle. Voici un raisonnement qui établit ce résultat.

On considère une bulle de rayon R dans un liquide où règne la pression P_0 . Notons P_1 la pression à l'intérieur de la bulle. Si le rayon augmente d'une quantité infinitésimale dR , la pression effectue un travail (force $\times$ déplacement) égal à $[(P_1 - P_0) \times 4\pi R^2] \times dR$, la superficie initiale de la bulle étant $4\pi R^2$. Mais en même temps, quand le rayon augmente de dR , la superficie de la bulle s'accroît de $8\pi R dR$, ce qui nécessite une énergie égale à $\sigma 8\pi R dR$. À l'équilibre, les deux énergies doivent se compenser, ce qui donne $P_1 - P_0 = 2\sigma/R$.



En revanche, lorsque le liquide est sursaturé en gaz, nous avons montré qu'il peut y avoir un équilibre stable pour une certaine valeur d'équilibre de l'angle de contact. En effet, dans cette situation, du gaz tend à pénétrer continûment dans la bulle à partir du liquide sursaturé, mais aussi tend à s'échapper sous l'effet de la pression interne de la bulle. Pour la valeur d'équilibre de l'angle de contact, la pression de Laplace et la surpression de gaz s'équilibrent et ces deux tendances se compensent.

DES NANOBULLES DE SURFACE EN ÉQUILIBRE STABLE

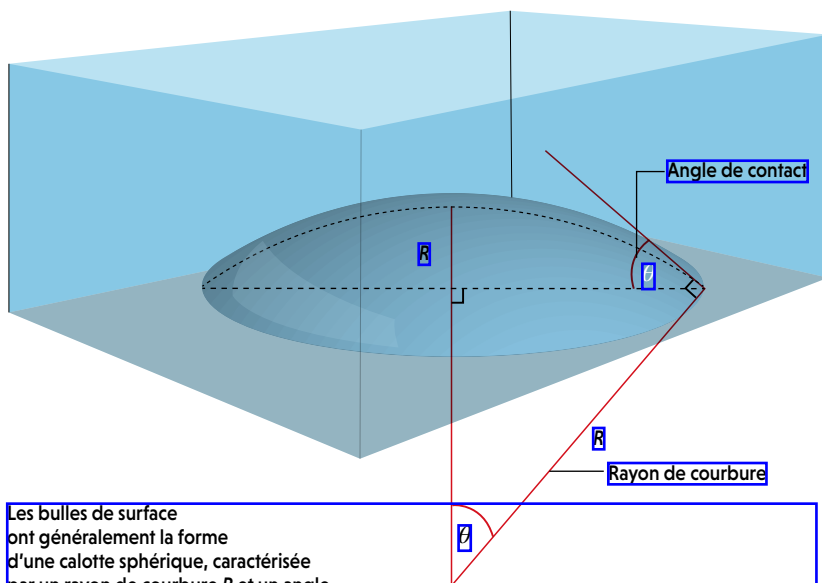
Cependant, cet équilibre n'existe pas toujours. En effet, si la taille de la bulle dépasse une valeur critique (qui dépend de la sursaturation, de la pression du liquide et de la tension superficielle), l'angle de contact augmente indéfiniment. Et lorsque cet angle atteint sa valeur maximale de 180 degrés, la bulle décolle de la surface. Dans cette situation, la sursaturation gagne contre la pression de Laplace: c'est le phénomène que l'on observe quotidiennement dans un verre de bière ou d'eau pétillante.

C'est précisément pourquoi les bulles de surface ne sont stables qu'à l'échelle nanométrique. À l'échelle macroscopique, le mécanisme de stabilisation ne fonctionne pas, car dans ce cas la pression interne de la bulle est trop faible et ne peut compenser la surpression du gaz de l'extérieur.

Nos calculs montrent enfin qu'à l'échelle microscopique, l'angle de contact de la bulle ne suit pas la relation de Young, comme on l'observe expérimentalement. Les simulations de dynamique moléculaire que nous avons effectuées avec Xuehua Zhang et deux autres collègues, en intégrant cette fois l'accrochage des nanobulles, confirment ce résultat.

Ainsi, pour un liquide sursaturé en gaz, nous avons pu expliquer pourquoi des bulles de surface suffisamment petites sont stables. Cependant, en pratique, les nanobulles se dissolvent en quelques jours. En effet, la sursaturation en gaz d'un liquide placé dans un récipient ouvert ne dure qu'un temps, car le gaz dissous dans le liquide diffuse et s'échappe en atteignant la surface libre.

En 2013, Joost Weijs et moi avons estimé le temps nécessaire pour que le gaz dissous au voisinage de la bulle s'échappe. Pour une distance de 3 centimètres séparant la bulle de la surface libre du liquide, ce temps de diffusion est de l'ordre de 5 jours. C'est précisément sur cette échelle de temps que se dissolvent des bulles d'air formées sur les parois d'un verre rempli d'eau froide du robinet, initialement saturée en gaz.



Les bulles de surface ont généralement la forme d'une calotte sphérique, caractérisée par un rayon de courbure R et un angle de contact (du côté du gaz) θ . Pour les nanobulles, cet angle de contact s'est révélé bien inférieur à celui prédit par la loi classique de Young-Dupré, qui est valide pour des bulles macroscopiques.

À PROPOS DE L'AUTEUR ET DU PRIX BALZAN

Detlef Lohse, de nationalité allemande, est professeur à l'université de Twente depuis 1998. Le prix Balzan récompense ses « contributions exceptionnelles à des domaines variés de la dynamique des fluides » : nanobulles et nanogouttes, sonoluminescence, transition vers la turbulence dans la convection de Rayleigh-Bénard, etc.

Le prix Balzan a été instauré en 1957 par la fondation Balzan, elle-même créée par la fille d'Eugenio Balzan (1874-1953), un journaliste italien devenu directeur administratif du *Corriere della Serra* et qui a fait fortune. Ce prix prestigieux est décerné chaque année dans quatre disciplines, choisies parmi « les lettres, les sciences morales et les arts » et « les sciences physiques, mathématiques, naturelles et médicales ».

Son montant est de 750 000 francs suisses (670 000 euros), dont la moitié doit être consacrée à des projets de recherche.

Un cinquième prix pour « l'humanité, la paix et la fraternité entre les peuples » est aussi de temps en temps attribué, ce qui fut le cas en 2018.

Notre modèle nous a ainsi permis de comprendre le comportement d'une seule nanobulle accrochée sur une surface idéale. La réalité, cependant, est plus compliquée. En général, les surfaces ne sont jamais parfaites à l'échelle microscopique et les nanobulles ne sont pas isolées: des bulles voisines sont ainsi susceptibles d'interagir.

Si les nanobulles se comportaient comme les bulles « classiques », on s'attendrait à ce qu'un groupe de nanobulles côte à côte aient toutes le même rayon de courbure. Cet équilibre est atteint à l'issue d'un processus, le « mûrissement d'Ostwald », où les plus petites bulles rétrécissent, en raison de leur plus grande pression interne, au profit des bulles voisines plus grandes. Mais est-ce vraiment le cas pour les nanobulles? La question a fait l'objet d'études détaillées.

En 2016, avec Benjamin Dollet, de l'Institut de physique de Rennes, nous avons étudié théoriquement la stabilité de deux bulles adjacentes. Nos résultats suggéraient que le processus de mûrissement d'Ostwald est supprimé ou du moins retardé par l'accrochage. Et en 2018, avec Xuehua Zhang et deux autres collègues, nous avons calculé numériquement le comportement d'une rangée de nanobulles voisines, avec un résultat similaire: l'interaction des bulles d'échelle nanométrique est très différente de ce que l'on observe pour des bulles plus grosses.

Tout cela reste à confirmer par les observations; malheureusement, il est très difficile de réaliser des expériences sur des nanobulles dans des conditions bien contrôlées. En particulier, pour contrôler la saturation en gaz du liquide, il faut sceller parfaitement le dispositif, de façon à empêcher le gaz de s'échapper.

Cependant, il existe un système physique analogue aux nanobulles de surface, mais

L'ÉVAPORATION D'UNE GOUTTE D'OUZO

Que se passe-t-il quand on dépose sur une surface de verre une goutte d'ouzo et que l'on attend qu'elle s'évapore ? Au début, la goutte déposée prend la forme habituelle d'une calotte sphérique (pour peu que l'effet du poids du liquide soit négligeable) et est transparente. Le liquide (mélange d'alcool, d'eau et d'anéthol ou huile d'anis) se met à s'évaporer peu à peu.

C'est surtout l'alcool (éthanol) qui s'évapore en premier, et cela surtout au niveau de la ligne de contact verre-liquide-air, le liquide étant à cet endroit plus exposé qu'ailleurs.

A un moment donné, la concentration en alcool au niveau de la ligne de contact n'est plus suffisante pour maintenir l'anéthol en solution, puisque sa solubilité diminue à mesure que la concentration en alcool baisse. Des nanogouttes et microgouttes d'anéthol naissent alors au niveau de la ligne de contact : le bord de la goutte devient blanc laiteux, car les gouttelettes microscopiques diffusent la lumière dans toutes les directions.

Cependant, l'évaporation sélective de l'alcool a un deuxième effet. La tension superficielle de l'eau est beaucoup plus élevée que celle de l'éthanol. Il se crée donc

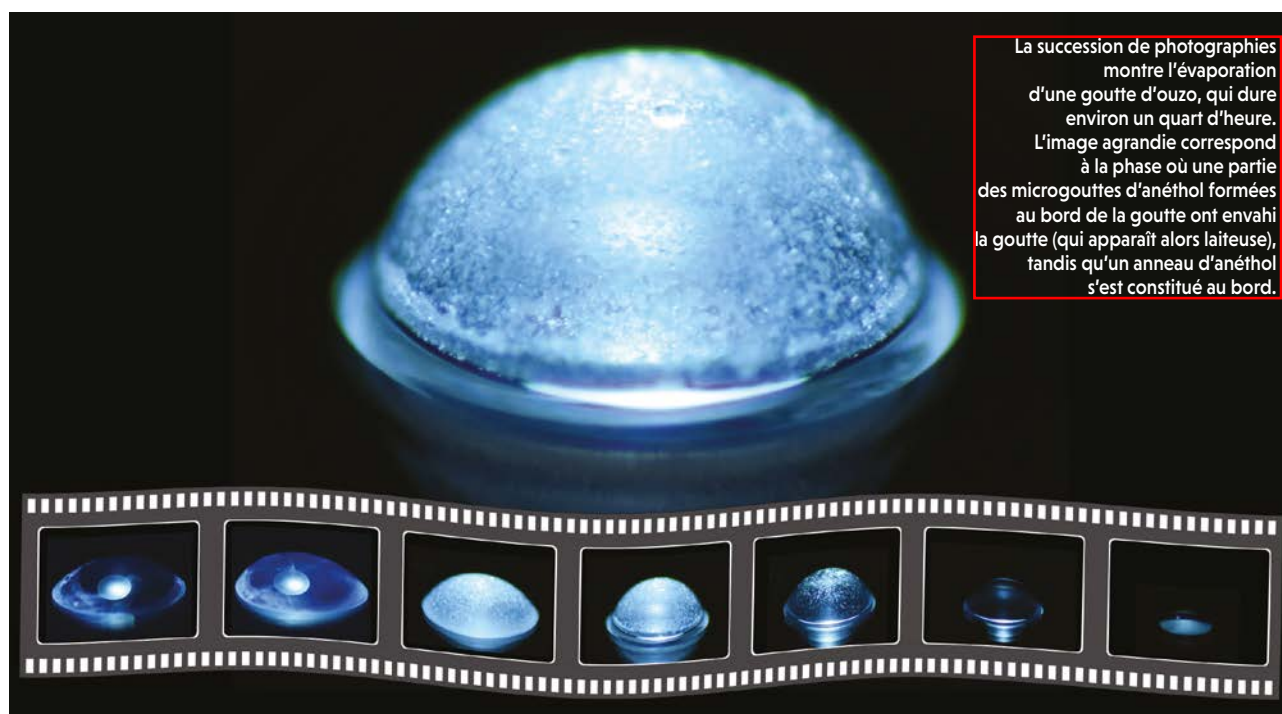
un gradient (une variation spatiale) de la tension superficielle à la surface de la gouttelette en direction de la ligne de contact, ce qui produit au sein de la goutte des écoulements, des mouvements de convection dite de Marangoni. Ces mouvements sont nettement visibles et peuvent atteindre une vitesse de un millimètre par seconde ; ils entraînent au sein de la goutte les microgouttes et nanogouttes d'huile d'anis nées sur le bord. Dans la deuxième phase d'évaporation de la goutte d'ouzo, la goutte entière devient donc rapidement laiteuse, tandis que de l'huile d'anis commence à se rassembler autour de la goutte.

A un moment donné, tout l'alcool de la goutte d'ouzo s'est évaporé. Dans cette troisième phase du processus d'évaporation, la goutte

redevient transparente, car les nombreuses petites gouttelettes d'anéthol se sont réunies pour former un anneau sur lequel repose l'eau restante, où l'anéthol n'est quasiment pas soluble. La goutte n'a alors plus la forme d'une calotte sphérique, mais présente deux angles de contact : celui entre l'anéthol et la surface du verre, et celui entre la goutte d'eau et l'anneau d'anéthol.

Dans la quatrième et dernière phase, enfin, l'eau s'est complètement évaporée. Ne subsiste qu'une goutte d'anéthol pur, transparente, dont la forme est celle d'une calotte sphérique et dont le volume est typiquement le $1/70^{\text{e}}$ du volume initial de la goutte d'ouzo.

L'ensemble du processus d'évaporation dure environ un quart d'heure.



La succession de photographies montre l'évaporation d'une goutte d'ouzo, qui dure environ un quart d'heure. L'image agrandie correspond à la phase où une partie des microgouttes d'anéthol formées au bord de la goutte ont envahi la goutte (qui apparaît alors laiteuse), tandis qu'un anneau d'anéthol s'est constitué au bord.

beaucoup plus facile à étudier expérimentalement : les nanogouttes de surface. Comme les bulles dans l'eau, les gouttes d'un liquide A formées dans un autre liquide B sont également contrôlées par les processus de diffusion. Leur comportement est décrit par la même théorie que celle développée pour les nanobulles, mais les nanogouttes sont bien plus faciles à manipuler expérimentalement, en jouant notamment sur la concentration du liquide B en liquide A. En choisissant soigneusement les liquides pour que leurs

solubilités ne soient ni trop faibles ni trop grandes, les processus de diffusion se déroulent sur une échelle de temps bien adaptée aux observations.

De plus, en utilisant des liquides polymérisables par ultraviolets, comme le diacrylate d'hexanediol-1,6 (ou HDODA), on peut stopper le processus de dissolution à tout moment par polymérisation et examiner ensuite tranquillement les gouttes ainsi solidifiées, par microscopie à force atomique ou même par microscopie électronique à balayage.

➤ Ainsi, en 2015, avec plusieurs collègues d'Australie et de l'université de Twente, nous avons étudié la dissolution de nanogouttes de HDODA dans de l'eau sur une échelle de temps commode de 20 minutes.

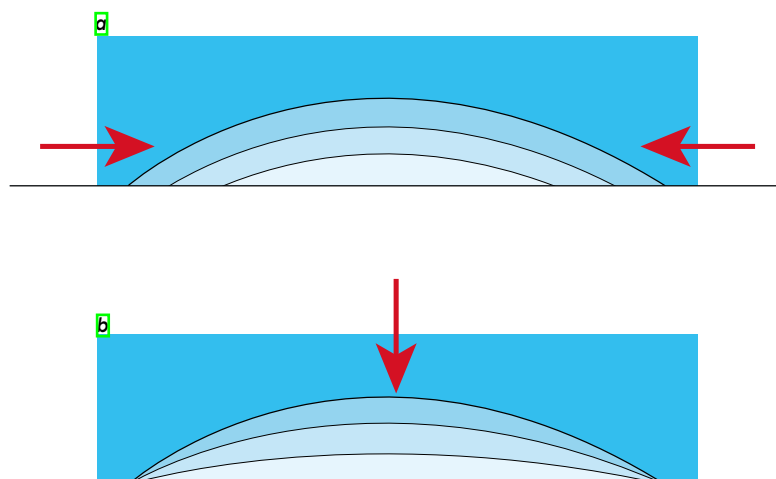
LES NANOGOUTTES, PLUS FACILES À ÉTUDIER QUE LES NANOBULLES

Nous avons notamment constaté que la dissolution des gouttelettes de surface ne se déroule généralement pas à angle de contact constant ni à rayon de contact constant, mais surtout selon des modes mixtes (voir la figure ci-dessous), similaires à ce que l'on peut constater pour des gouttes d'eau s'évaporant dans l'air. Ces résultats confirment que, comme pour les nanobulles, l'accrochage du contour de la goutte sur la surface joue un rôle essentiel.

Si la dissolution des nanogouttes de surface est analogue à celle des nanobulles de surface, l'analogie s'applique également aux processus de formation et de croissance des nanogouttes.

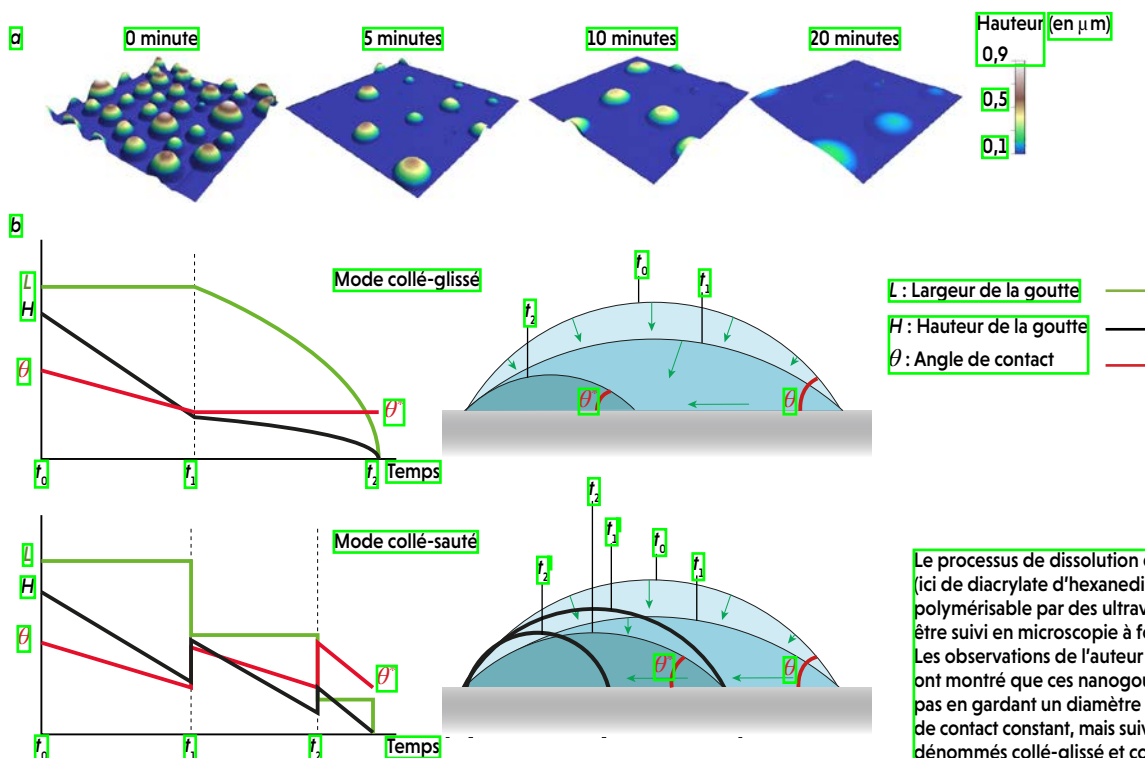
Pour produire de façon contrôlée des nanogouttes de surface, on utilise aussi un procédé d'échange de solvant : on remplace un liquide saturé d'une certaine substance et ayant une solubilité élevée pour celle-ci par un autre liquide de solubilité plus faible. La nucléation de gouttes se produit naturellement lorsque l'échange de solvant a lieu près d'une surface hydrophobe.

La nucléation spontanée de gouttelettes fait penser à un phénomène bien connu que l'on peut observer avec l'ouzo grec (ou le pastis



Les observations de nanobulles de surface exposées à un liquide sous-saturé en gaz ont montré qu'elles se dissolvent lentement non pas en diminuant de taille latérale (a), mais en réduisant l'angle de contact avec la surface (b) : la ligne de contact solide-liquide-gaz de la bulle reste accrochée à la surface. Cet accrochage a permis d'expliquer la stabilité des nanobulles de surface.

français, ou le raki turc). Cette boisson est un mélange d'alcool (à 50%), d'eau et d'anéthol, aussi appelé huile d'anis, qui est un composé à l'odeur anisée particulièrement soluble dans l'alcool. Au moment de servir, on ajoute de l'eau à l'ouzo, qui est initialement transparent. En diluant l'ouzo, on réduit sa concentration en alcool, ce qui diminue la solubilité de l'anéthol : d'innombrables et minuscules gouttelettes d'anéthol naissent alors dans la solution sursaturée et confèrent au mélange d'ouzo et d'eau son aspect laiteux.



La dilution de l'ouzo avec de l'eau produit d'innombrables gouttelettes d'anéthol

L'évaporation d'une goutte d'ouzo se fait aussi par un processus d'échange de solvant, qui est intéressant et très facile à observer chez soi. Il suffit de déposer une petite goutte d'ouzo sur une surface en verre et de la regarder s'évaporer, ce qui dure une quinzaine de minutes. L'expérience est très visuelle : l'alcool s'évapore en premier et la concentration en eau augmente, jusqu'à ce que des milliers de toutes petites gouttes se forment soudainement. Nous avons réalisé cette expérience au laboratoire en 2015, pour analyser le processus en détail. C'était la première fois que l'on étudiait l'évaporation d'un mélange de trois liquides de volatilités et solubilités différentes (voir l'encadré page 63).

UN PROCESSUS CLÉ EN MICROCHIMIE

Les travaux évoqués ici peuvent laisser penser que les chercheurs ne font que jouer inutilement avec de l'eau, de l'alcool et des boissons alcoolisées. Cette impression est tout à fait fautive. Les bulles et gouttes de surface microscopiques ainsi que le processus d'échange de solvants ont une grande importance technologique. En témoignent les quelques exemples suivants.

Un premier exemple est l'extraction liquide-liquide, c'est-à-dire le transfert d'une substance dissoute dans un solvant à un autre solvant. C'est l'un des processus centraux en génie chimique et en analyse chimique. Depuis les travaux du chimiste autrichien Fritz Pregl (prix Nobel en 1923) sur la microanalyse de substances organiques, on s'efforce de miniaturiser les procédés. La nécessité d'y parvenir est devenue plus impérieuse ces dernières années. D'une part, on voudrait détecter des traces toujours plus ténues de substances chimiques, que ce soit dans un contexte médical ou pour des études environnementales. D'autre part, cette détection doit être rapide et porter sur de petits échantillons, notamment afin de rendre les techniques d'analyse chimique plus écologiques.

Une façon d'y parvenir est la microextraction sur une seule goutte, technique dans laquelle une substance A dissoute dans l'eau, par exemple, migre peu à peu dans une goutte d'un solvant organique (par exemple du tétrachlorure de carbone) ayant une solubilité beaucoup plus élevée pour A, cette goutte étant maintenue dans la solution aqueuse. La goutte de solvant organique est ensuite extraite et analysée. Cependant, ce procédé est généralement lent et son efficacité est faible.

Ces limitations ont été élégamment surmontées grâce à la microextraction liquide-liquide dispersée (DLLME, pour *dispersive liquid-liquid microextraction*) inventée il y a seulement une dizaine d'années. Dans cette technique, on fait intervenir un troisième liquide qui se mélange bien avec l'eau et le tétrachlorure de carbone, par exemple l'éthanol. Si l'on verse une goutte de mélange de tétrachlorure de carbone et d'éthanol dans l'eau contenant la substance A à extraire, des nanogouttes et microgouttes de tétrachlorure de carbone se forment instantanément au cours de ce processus d'échange de solvant, comme le ferait l'anéthol lorsqu'on dilue une goutte d'ouzo dans de l'eau. Ces minuscules gouttelettes de solvant organique permettent d'extraire la substance A très efficacement, grâce à la très grande surface de contact offerte par l'ensemble des gouttelettes.

Une bonne compréhension et un bon contrôle des processus diffusifs dans et autour des bulles et gouttelettes microscopiques peuvent même sauver des vies. En chirurgie à cœur ouvert, la circulation sanguine est souvent découplée du cœur et maintenue par une machine cœur-poumon, où le sang est considérablement refroidi. Or, comme dans l'eau, l'air se dissout davantage dans le sang froid que dans le sang chaud. Lorsqu'on réchauffe le patient après l'opération, un processus d'échange de solvant a lieu, d'où la formation possible de nanobulles et microbulles (de surface), ce qui peut altérer considérablement l'apport sanguin par endroits. Ici aussi, il est essentiel de bien comprendre la nucléation des bulles pour éviter ce phénomène.

L'électrolyse et la catalyse, enfin, sont d'autres exemples de processus où des bulles microscopiques peuvent se former, en l'occurrence à la surface des électrodes ou du catalyseur, et nuire ainsi considérablement à l'efficacité des réactions. Comment empêcher l'apparition de ces bulles ou s'en débarrasser ? Cela me semble être un autre domaine de recherche très prometteur pour la physique des fluides. La compréhension des nanobulles et nanogouttes de surface n'est donc qu'un premier pas vers la construction d'un pont reliant la dynamique moderne des fluides au génie des procédés physicochimiques et à la chimie des colloïdes. ■

BIBLIOGRAPHIE

X. Zhu et al., **Diffusive interaction of multiple surface nanobubbles : shrinkage, growth, and coarsening**, *Soft Matter*, vol. 14, pp. 2006-2014, 2018.

H. Tan et al., **Evaporation-triggered microdroplet nucleation and the four life phases of an evaporating Ouzo droplet**, *PNAS*, vol. 113(31), pp. 8642-8647, 2016.

D. Lohse et X. Zhang, **Surface nanobubbles and surface nanodroplets**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 87, pp. 981-1035, 2015.

X. Zhang et al., **Mixed mode of dissolving immersed nanodroplets at a solide-water interface**, *Soft Matter*, vol. 11, pp. 1889-1900, 2015.

L'ESSENTIEL

> L'homme a toujours fait la guerre, qui serait innée en lui, selon la conception des « faucons ».

> La guerre est une activité apparue avec la complexification des sociétés, selon la conception des « colombes ».

> Les données archéologiques et anthropologiques sont plutôt en faveur de la seconde thèse : les violences collectives résulteraient des bouleversements sociaux et culturels survenus au cours des 12 000 dernières années.

L'AUTEUR



R. BRIAN FERGUSON
professeur d'anthropologie
à l'université Rutgers
à Newark, aux États-Unis

Sommes-nous des guerriers-nés?

Pourquoi les hommes font-ils la guerre? L'ont-ils toujours faite? Le croisement des données archéologiques, anthropologiques et ethnologiques apporte un nouvel éclairage sur ces questions très controversées.

Ya-t-il dans la nature humaine une prédisposition à tuer des membres d'autres groupes? Je ne parle pas d'éliminer un congénère pour des raisons personnelles, mais de prendre les armes et faire la guerre – une violence collective, organisée, où des groupes sont missionnés pour anéantir d'autres groupes. Ce comportement est-il inné, c'est-à-dire le résultat d'une propension naturelle de l'espèce humaine, produit de l'évolution, à éliminer les rivaux potentiels? Cela impliquerait que les humains, mais peut-être aussi les chimpanzés et leurs ancêtres communs, se sont toujours collectivement entretués (voir l'encadré page 70). Ou bien la guerre a-t-elle émergé au cours des derniers millénaires avec l'évolution des sociétés? Ces deux thèses ont chacune leurs partisans, que l'anthropologue américain Keith Otterbein désignait sous les noms de « faucons » et de « colombes ».

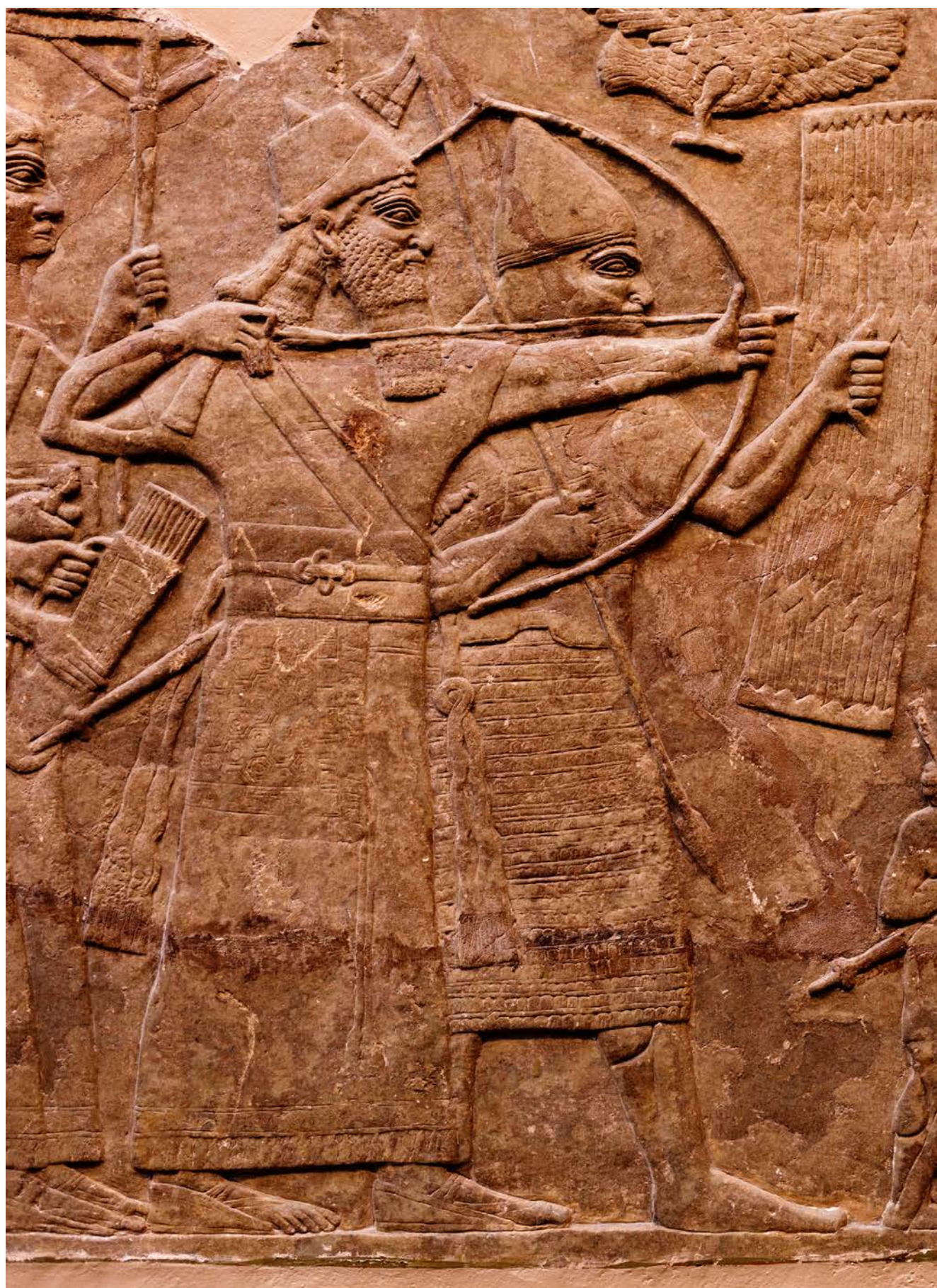
Si, comme l'affirment les faucons, la guerre est inscrite dans nos gènes, les sociétés préhistoriques devaient également s'y adonner. Au début des années 2000, l'archéologue américain Steven LeBlanc et Katherine Register écrivaient ainsi: « Lorsque nous avons une bonne connaissance archéologique d'une société, des traces de conflits apparaissent presque toujours [...]. La

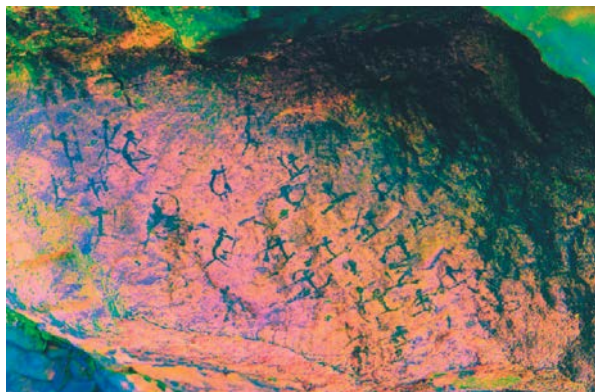
guerre pourrait être à l'origine de 25% des décès. » Des psychologues évolutionnistes avancent même qu'avec de telles pertes, la guerre a contribué à la sélection naturelle en favorisant les individus les plus aptes à se procurer à la fois des partenaires et des ressources.

Cette vision des choses a trouvé un large écho bien au-delà du milieu scientifique. Selon l'essayiste et politologue américain Francis Fukuyama, les guerres et les génocides récents puisent leurs racines au temps des chasseurs-cueilleurs, il y a des dizaines ou des centaines de milliers d'années, voire dans un passé plus lointain encore, avant que la lignée humaine ne se sépare de celle des chimpanzés, il y a 5 à 7 millions d'années. Pour l'éminent spécialiste en relations internationales Bradley Thayer, la propension des groupes humains à la xénophobie et à l'ethnocentrisme résulte de la transformation, au cours de l'évolution, de l'instinct de protection des individus à l'égard de leur tribu.

Autant d'assertions que les anthropologues et les archéologues du camp des colombes réfutent. Les humains, avancent-ils, ont une évidente capacité à se battre, mais leur cerveau n'est pas câblé pour identifier et tuer tout étranger impliqué dans un combat collectif. Pour eux, les conflits létaux entre communautés n'ont émergé qu'à la fin du Paléolithique, lorsque les sociétés de chasseurs-cueilleurs se

La guerre existe depuis plusieurs millénaires. Mais la survenue de conflits collectifs violents dans un passé plus ancien, où il n'y avait que des chasseurs-cueilleurs formant des sociétés « simples », fait encore débat.





▢ sont agrandies et complexifiées. Ils se sont ensuite multipliés au Néolithique avec la sédentarisation et l'avènement de l'agriculture. De fait, l'archéologie et la comparaison avec les peuplades actuelles de chasseurs-cueilleurs permettent de repérer les périodes durant lesquelles des combats collectifs sont apparus et intensifiés et, dans une certaine mesure, leurs circonstances sociales.

Des peintures rupestres du Levant espagnol réalisées entre 8000 et 5000 ans avant notre ère font partie des premiers témoignages avérés de conflit armé entre deux groupes (la photographie de gauche est complétée par une image à contraste renforcé et par un croquis de la scène représentée).

DES DÉBUTS INCERTAINS

Les archéologues disposent d'une documentation hétérogène et souvent délicate à interpréter. Ils peuvent s'appuyer sur l'art pariétal. Les peintures qui ornent les parois des grottes paléolithiques de Cougnac et de Pech Merle, dans le Lot, et celles de la grotte Cosquer, dans les Bouches-du-Rhône, qui datent d'environ 25000 ans, montrent par exemple des individus en position plus ou moins allongée transpercés de traits. Mais s'agit-il d'individus blessés ou frappés mortellement par des lances, comme l'avancent certains préhistoriens, ou, selon une autre interprétation, de représentations de forces shamaniques? Il est malheureusement impossible de répondre.

Les premiers témoignages avérés de confrontations entre groupes armés nous sont offerts par l'art plus tardif du Levant espagnol (entre 8000 et 5000 avant notre ère). Des scènes spectaculaires évoquent clairement des activités violentes, voire franchement guerrières: combats entre bandes rivales d'archers, embuscades, massacres de personnes désarmées et même exécutions.

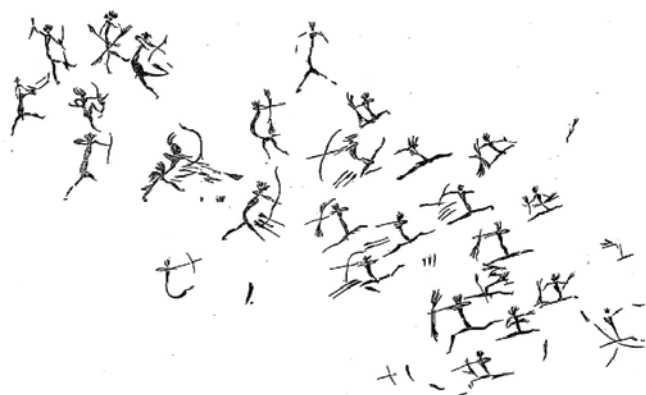
Autres indices matériels de conflits létaux: les armes. Mais là encore, la prudence est de mise. Il ne fait aucun doute que l'épée et l'arsenal défensif (casques, boucliers, cuirasses...), inventés à l'âge du Bronze, aux alentours de 1700 ou 1600 avant notre ère, incarnent le guerrier. Mais il est parfaitement possible de combattre avec des instruments créés pour d'autres usages. Vers 5000 avant notre ère, dans le sud de l'Allemagne, des villageois ont été massacrés à coups d'herminettes servant traditionnellement à travailler le

bois. À l'inverse, des outils comme les masses en pierre, qui semblent destinées à tuer, ont parfois une tout autre fonction. Au Proche-Orient, ces masses symbolisaient l'autorité, et étaient peut-être un moyen de résoudre pacifiquement des conflits.

Les vestiges des implantations humaines constituent une troisième source d'informations. Les populations se sentant menacées prennent généralement des précautions. Par exemple, les habitats dispersés de fond de vallée peuvent être abandonnés au profit de places circonscrites plus facilement défendables. Au Néolithique, une multitude de villages d'Europe s'entourent ainsi d'enceintes fortifiées. Cependant, toutes ne semblent pas conçues pour la défense. Certaines servent aussi à affirmer l'identité ou la puissance des occupants.

Un quatrième type d'indices d'activité guerrière est constitué par les marques de blessures sur les ossements humains. Mais pour les périodes les plus anciennes du Paléolithique, les restes osseux sont rares et ceux présentant des traumatismes encore plus. Et lorsqu'ils existent, leur interprétation est délicate. Seule une blessure par projectile sur trois ou quatre laisse une trace sur les os. Sans compter qu'une pointe de pierre ou d'os retrouvée dans la tombe d'un défunt peut avoir causé sa mort ou simplement faire partie des objets cérémoniaux. En outre, il est impossible de savoir si une blessure non cicatrisée résulte d'un accident, d'une exécution ou d'un homicide. Mais comme je l'ai dit, homicide et guerre sont deux choses différentes. Et tous les combats ne sont pas létaux. Les archéologues trouvent fréquemment dans les sépultures des traces de fractures par enfoncement de la calotte crânienne cicatrisées, mais rares sont celles qui ont pu causer la mort. Il est probable que nos ancêtres se bagarraient ou réglaient leurs conflits personnels autrement qu'en tuant.

Pris individuellement, tous ces indices sont généralement ambigus et discutables. Il est souvent nécessaire d'en rassembler plusieurs pour avoir un début de soupçon de guerre ou établir la probabilité d'un tel événement. Mais



CHASSEURS-CUEILLEURS : LA GUERRE INVISIBLE

On a peine à croire, en voyant les épées de l'âge du Bronze,

les fresques retraçant

l'épopée martiale de Gilgamesh, les forteresses médiévales ou nos plus modernes cimetières militaires, que les guerres passées aient pu, en quelque sorte, disparaître sans laisser d'indices. Pourtant, s'agissant de possibles conflits armés intervenus dans des sociétés de chasseurs-cueilleurs mobiles, tout concourt à les rendre indécélables par l'archéologie. La première raison, évidente, est la longueur de la période écoulée – plusieurs milliers d'années pour le Paléolithique européen. Mais il en est d'autres, tout aussi redoutables.

des fouilles archéologiques scrupuleuses permettent au moins de s'en assurer.

Quels sont les indices en faveur de la réalité de la guerre au cours de l'histoire humaine ? Tout dépend de l'échantillon considéré et de sa représentativité ! Si l'on ne considère que les rares exemples connus pour leur fréquence élevée de blessures mortelles, on peut conclure, comme Steven LeBlanc et Katherine Register, que 25% des décès sont des morts violentes. La propagation d'idées fausses résulte aussi du biais médiatique consistant à mettre en avant les découvertes de massacres anciens : c'est ignorer les innombrables fouilles qui ne révèlent aucune trace de tuerie.

L'analyse fine des documents se rapportant à une région et une période données permet d'esquisser un tout autre tableau dans lequel la violence collective est à peine présente et devient même imperceptible à mesure que l'on remonte dans le temps. Si la guerre n'a pas toujours existé, quand a-t-elle émergé ?

PREMIÈRES HOSTILITÉS AVÉRÉES IL Y A 14 000 ANS

Pour de nombreux archéologues, elle est apparue au cours du Mésolithique. Cette période qui débute en Europe après la dernière grande glaciation, vers 9700 avant notre ère, marque de fait une bascule. N'étant plus contraints de se déplacer autant pour trouver leur nourriture, les chasseurs-cueilleurs ont commencé à se sédentariser et à former des sociétés plus complexes. Mais la réalité n'est pas aussi simple. Car la guerre semble apparaître en plusieurs endroits et à différents moments.

La première preuve convaincante d'un massacre collectif remonte ainsi au Paléolithique. Vers 12000 avant notre ère, au pied du Djebel Sahaba, sur les rives du Nil, dans le nord du Soudan, 59 chasseurs-cueilleurs ont été attaqués et tués par une tribu rivale. Les squelettes d'une trentaine d'hommes, de femmes et d'enfants portent des traces de coups ou de pointes de flèches. Des heurts qui témoignent vraisemblablement de la forte

compétition entre groupes pour s'approprier des ressources de plus en plus rares.

Au Proche-Orient, au nord du Tigre, des conflits ont vraisemblablement opposé des villages de chasseurs-cueilleurs entre 9750 et 8750 avant notre ère. Non loin de là se trouvent les plus anciennes fortifications villageoises connues dans la région. Construites au VII^e millénaire par des agriculteurs, elles traduisent une volonté de se défendre. Et la première prise d'une agglomération urbaine par la force est plus récente encore, puisqu'elle se situe entre 3800 et 3500 avant notre ère. À cette date, la guerre est largement répandue dans toute l'Anatolie, notamment en raison des vagues migratoires venues du nord du Tigre.

Autres lieux, autres temps. Le sud du Levant, entre le Sinaï, le sud du Liban et la Syrie, n'a livré aucun indice probant de combats collectifs antérieurs à 3200 avant notre ère. Au Japon, les morts violentes sont rares parmi les groupes de chasseurs-cueilleurs de 13000 à 800 avant notre ère. Avec le développement de la riziculture humide, à partir de

La guerre peut en effet laisser trois types de traces. Les premières sont documentaires. Dans des sociétés sans écriture, il ne peut s'agir que de productions artistiques. Or celles-ci, bien qu'elles nous soient parfois parvenues en grand nombre, ne figurent pas nécessairement des humains. Quant aux rares œuvres de chasseurs-cueilleurs, qui, dans le monde, dépeignent des scènes de violence armée, il est très difficile d'en inférer la réalité sociale qui les a inspirées.

En ce qui concerne

les moyens matériels de la guerre, des chasseurs-cueilleurs mobiles n'ont, par définition, édifié aucune des infrastructures qui, depuis des millénaires, sont associées à l'activité martiale (fortifications, arsenaux ou casernes, etc.). Leurs armes elles-mêmes, en l'absence de métal, n'ont pu se conserver sur d'aussi longues durées que dans des circonstances exceptionnelles. Des armes offensives, on ne retrouve tout au plus que des pointes d'os ou de pierre, dont il est presque impossible de déterminer l'usage – chasse ou combat ? Des boucliers ou des armures de matières organiques tels qu'en portaient récemment divers chasseurs-cueilleurs, il ne peut pour ainsi dire rien rester.

Enfin, la guerre meurtrit

les corps, mais toute mort violente ne laisse pas une trace sur le squelette, et toute trace de violence ne résulte pas nécessairement d'une guerre. S'agissant de sociétés aux effectifs limités, qui nomadisaient et ne possédaient presque jamais de cimetières, la probabilité de retrouver un groupe de victimes est très faible. Si l'on ajoute à cela des coutumes funéraires consistant à démembrer ou à ingérer le corps des ennemis ou celui de ses propres parents tombés au combat, ainsi qu'on a pu l'observer par exemple en Australie, cette probabilité devient infime.

CHRISTOPHE DARMANGEAT

Laboratoire Dynamiques sociales et reconstitution des espaces (Ladyss), université Paris-Diderot

300 avant notre ère, elles deviennent bien plus fréquentes. Sur les sites archéologiques nord-américains les mieux étudiés, quelques traumatismes squelettiques très anciens semblent dus à des conflits personnels plutôt que collectifs. Les premières traces connues de tuerie remontent à 5400 avant notre ère en Floride, et à environ 2200 avant notre ère dans certaines parties du Pacifique nord-ouest. Mais dans le sud des Grandes Plaines américaines, une seule mort violente a été enregistrée avant l'an 500 de notre ère!

DES CONDITIONS FAVORISANT LA GUERRE

Il existe plusieurs conditions préalables qui rendent la guerre plus probable: transition vers un mode de vie plus sédentaire, essor démographique régional, concentration de ressources telles que le bétail, complexification et hiérarchisation des sociétés, commerce de biens de valeur, établissement de frontières entre groupes sociaux ou d'identités collectives. Ces conditions peuvent également se conjuguer avec de profonds changements environnementaux.

Ainsi, le massacre de Djebel Sahaba pourrait être lié à une crise écologique: le climat qui régnait sur le nord du Soudan à la fin du Paléolithique est devenu plus aride, ce qui a pu modifier le débit du Nil, condamner des marais productifs et *in fine* pousser les hommes à abandonner leur territoire.

Plus tard, des siècles après l'apparition de l'agriculture, l'Europe néolithique (par exemple) montre que quand les gens ont davantage de motifs de se battre, leurs sociétés s'organisent de façon à mieux être préparées à la guerre et à la pratiquer.

Toutefois, l'archéologie ne peut pas tout expliquer. Pour trouver plus d'informations sur ces conditions préalables à la guerre, il faut aussi se tourner vers l'ethnologie, c'est-à-dire l'étude des cultures passées et actuelles. Une différence fondamentale existe entre communautés de chasseurs-cueilleurs «simples» et «complexes». Depuis l'apparition d'*Homo sapiens*, il y a 300 000 ans environ, et durant plusieurs dizaines de milliers d'années, les humains ont vécu grâce à la chasse et la cueillette. D'une façon générale, ils coopéraient les uns avec les autres, formaient de petits groupes nomades et égalitaires, exploitaient de vastes zones peu peuplées et n'avaient que peu de biens matériels.

Bien différentes sont les communautés «complexes» de chasseurs-cueilleurs. Sédentaires, elles regroupent plusieurs centaines de personnes, ont une structure sociale inégalitaire avec des lignages, des clans voire des chefs. Les premiers signes d'une telle complexité sociale se manifestent au cours du Mésolithique. Ils marquent parfois – pas toujours – une étape vers le développement de

LES CHIMPANZÉS S'ENTRETIENNENT, MAIS FONT-ILS LA GUERRE?

S'interroger sur la prédisposition guerrière des humains implique de comparer avec nos plus proches parents, les bonobos et les chimpanzés. Les premiers ne s'entretenant pas. Les seconds, oui. Mais leurs combats meurtriers n'ont pas les dimensions sociales et cognitives de la guerre chez les humains (qui oppose des groupes formés d'individus divers unis par des formes variées d'organisation politique, et qui est favorisée par des systèmes de connaissances et de valeurs culturelles spécifiques donnant un sens très fort à l'expression « nous contre eux »). Pourtant, certains

scientifiques n'hésitent pas à faire l'analogie entre le comportement violent des chimpanzés et la guerre humaine. Et pour eux, ces singes ont une propension innée à tuer des membres étrangers à leurs groupes.

Mes travaux vont à l'encontre d'une telle affirmation. Les agressions mortelles perpétrées entre bandes de chimpanzés semblent plutôt se développer là où l'homme joue les perturbateurs, en braconnant, en détruisant leur habitat ou en leur fournissant de la nourriture.

Pour parvenir à cette conclusion, j'ai passé en revue tous les meurtres recensés jusqu'à présent chez les chimpanzés. Une compilation réalisée en 2014 des données accumulées depuis les années 1960 dans 18 communautés est à ce titre riche d'enseignements. Sur les 152 agressions mortelles recensées, 27 sont dues à des affrontements entre communautés, dont 15 sont concentrées sur deux sites et deux périodes: 1974-1977 et 2002-2006.

Comment expliquer ces

«anomalies»? Tuer est-il pour les chimpanzés un moyen de réduire le nombre de mâles dans les groupes rivaux comme l'avancent certains biologistes de l'évolution? Le même lot de données montre qu'en se restreignant aux mâles tués par un groupe extérieur, seul 1 individu disparaît tous les 47 ans. Soit moins de un dans la vie d'un chimpanzé!

La «guerre» chez ces singes ne m'apparaît donc pas être une stratégie évolutive, mais une réponse induite par l'homme. Des analyses au cas par cas montreront que les chimpanzés, en tant qu'espèce, ne sont pas des «singes tueurs». Ce qui va aussi à l'encontre de l'idée que le comportement belliqueux des humains est hérité d'un ancêtre commun des chimpanzés et des humains.
R. B. F.

l'agriculture. De plus, ces communautés complexes se font fréquemment la guerre.

Les conditions favorisant la guerre ne sont toutefois qu'une partie de l'histoire. Car elles ne suffisent pas à prédire sa survenue. Elles étaient par exemple réunies pendant plusieurs milliers d'années dans le sud du Levant sans que surgissent des conflits meurtriers. Pourquoi? Simplement parce qu'il existe dans de nombreuses sociétés des conditions favorisant la paix. Les liens de parenté, les alliances matrimoniales, la coopération dans la chasse, le partage des tâches agricoles et de la nourriture, les arrangements sociaux permettant aux individus de passer d'un groupe à l'autre, les normes qui valorisent la paix et stigmatisent le meurtre, les modes reconnus de résolution de conflits: ces mécanismes n'empêchent pas les affrontements, mais ils les canalisent de façon à éviter des massacres sanglants ou à n'impliquer qu'un nombre limité d'individus.

Mais dans ce cas, pourquoi les enquêtes archéologiques ou les rapports des explorateurs et des anthropologues regorgent-ils de conflits meurtriers? Parce qu'au fil des millénaires, les conditions préalables à la guerre se sont trouvées réunies dans des endroits toujours plus nombreux. Une fois établie, la guerre tend à se propager, les groupes violents remplaçant ceux

qui le sont moins. Des États capables de déployer des forces militaires sur leurs frontières et sur les routes commerciales se sont développés partout dans le monde. À cela s'ajoutent les bouleversements climatiques, en particulier les successions de phénomènes météorologiques extrêmes (sécheresses, canicules, etc.), qui aggravent ou créent les conditions propices à la guerre. Et la paix peut tarder à revenir après l'amélioration de la situation.

C'est particulièrement évident lorsque, vers 950, le monde est entré dans l'«optimum climatique médiéval», une période inhabituellement chaude, avant de basculer rapidement à partir de 1300 environ dans le «Petit Âge glaciaire», qui s'achèvera vers 1850. Ces quelque six siècles ont connu nombre de troubles sociaux et politiques, voire de conflits meurtriers, des Amériques à la Chine en passant par le Pacifique, l'Europe, etc. La guerre était établie presque partout depuis longtemps, mais les conflits se sont aggravés et le nombre de victimes a considérablement augmenté.

Puis est venue l'expansion européenne qui a transformé, intensifié et parfois même suscité les guerres indigènes un peu partout. Ces affrontements n'étaient pas uniquement motivés par la soif de conquête des uns et l'esprit de résistance des autres. Des heurts ont aussi éclaté entre les populations locales, entraînées dans de nouvelles hostilités par les autorités coloniales.

L'expansion coloniale et les conflits qui l'ont accompagnée ont favorisé l'émergence d'identités tribales distinctes et, *in fine*, de nouvelles divisions. Les régions qui échappaient au contrôle des autorités coloniales subirent elles aussi les conséquences des politiques de celles-ci (commerce à longue distance, déplacements de populations...), à l'origine de conflits violents. En imposant aux autochtones de nouvelles institutions politiques, de nouvelles normes ou de nouvelles territorialités, incompatibles avec les réalités locales, les États coloniaux ont monté les populations les unes contre les autres.

Souvent, les chercheurs tentent de démontrer que la volonté de l'homme de prendre part à des violences collectives a précédé la formation des États en traquant les preuves d'hostilités dans des zones «tribales» actuelles, où la «sauvagerie» semble endémique et passe comme une expression de la nature humaine. Mais l'exemple suivant montre combien il est illusoire de vouloir expliquer les faits et gestes de nos ancêtres par ceux observés chez des peuples actuels.

Les chasseurs qui vivaient dans le nord-ouest de l'Alaska entre la fin du XVIII^e siècle et le XIX^e siècle se sont livrés à de violents affrontements dont les traditions orales se font aujourd'hui encore l'écho. Des villages entiers furent massacrés. Cet exemple est avancé

comme preuve de l'existence de la guerre chez les chasseurs-cueilleurs avant qu'ils ne soient perturbés par les États. Pourtant l'archéologie, combinée à l'histoire régionale, livre une version bien différente. Les traces anciennes de cultures «simples» de chasseurs-cueilleurs d'Alaska ne montrent pas de signes de violence collective. Ceux-ci apparaissent seulement entre 400 et 700 et coïncident probablement avec l'arrivée de migrants venus d'Asie ou du sud de l'Alaska, où la guerre était déjà établie. En outre, ces conflits étaient d'extension limitée et probablement de modeste intensité.

Avec les conditions climatiques favorables qui ont régné jusqu'en 1200, l'organisation sociale des communautés de chasseurs de baleines s'est progressivement complexifiée : les populations se sont sédentarisées et densifiées, le commerce à longue distance s'est développé... Quelques siècles plus tard, la guerre est devenue endémique. Mais au XIX^e siècle, les conflits sont devenus si graves que la population régionale a décliné. Ce sont eux que les traditions orales ont gardés en mémoire. Or ils trouvent leur origine dans l'élan expansionniste des Russes. Impliqués dans le commerce des fourrures animales, et notamment de la loutre de mer, ces derniers ont annexé à la fin du XVIII^e siècle les îles Aléoutiennes et l'Alaska. Et y ont installé des comptoirs de traite (c'est-à-dire des lieux d'échanges de marchandises) afin d'alimenter un réseau commercial devenu international. Les conflits qui ont éclaté avec les sociétés tribales autochtones se sont soldés par une territorialisation extrême de celles-ci.

BIBLIOGRAPHIE

N. C. Kim et M. Kissel, **Emergent Warfare in Our Evolutionary Past**, Routledge, 2018.

M. Patou-Mathis, **Préhistoire de la violence et de la guerre**, Odile Jacob, 2013.

M.-C. Marandet (dir.), **Violence(s) de la Préhistoire à nos jours**, Presses universitaires de Perpignan, 2011 (<https://books.openedition.org/pupvd/3389>).

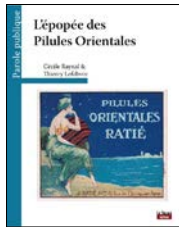
D. P. Fry, **Beyond War : The Human Potential for Peace**, Oxford University Press, 2007.

R. B. Ferguson et N. L. Whitehead (éd.), **War in the Tribal Zone : Expanding States and Indigenous Warfare**, School of American Research Press, 1992.

LA GUERRE EST UNE INVENTION

Le débat sur la guerre et la nature humaine est encore loin d'être résolu. L'idée qu'une violence extrême, faisant de nombreuses victimes, était omniprésente tout au long de la Préhistoire a de nombreux partisans. Elle trouve une résonance culturelle chez ceux qui sont persuadés que nous, les humains, sommes naturellement enclins à faire la guerre. Comme le disait ma mère : «Tu n'as qu'à regarder l'histoire!» Mais au vu de l'ensemble des données disponibles, les colombes l'emportent sur les faucons. Force est de constater que pour les périodes les plus anciennes, les preuves de guerre manquent.

Les gens sont ce qu'ils sont. Ils se battent, tuent parfois, et font la guerre lorsque les conditions et la culture l'imposent. Mais ces conditions et les cultures belliqueuses qu'elles engendrent ne sont devenues communes qu'au cours des 10000 dernières années, et bien plus récemment dans la plupart des régions. La rareté des morts violentes durant la Préhistoire donne du poids à la célèbre formule de l'anthropologue Margaret Mead : «La guerre n'est qu'une invention – pas une nécessité biologique.» ■



C. Raynal et T. Lefebvre ont récemment publié : **L'Épopée des Pilules Orientales** (Le Square Éditeur, 2018).

Commercialisées en 1887, les Pilules Orientales (ici une étiquette de ces pilules vers 1930), censées raffermir la poitrine, eurent un succès considérable jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.



L'ESSENTIEL

> En 1886, le pharmacien François Boisson lance une nouvelle spécialité pharmaceutique, les Pilules Orientales.

> Destinées à développer les seins, ces pilules rencontrent vite un succès.

> Leur commercialisation prend encore de l'ampleur

à partir de 1897, quand le jeune pharmacien Jules Ratié rachète l'affaire.

> Associé au publicitaire Jules Fortin, il développe le marché jusqu'en Amérique.

> La législation du médicament, qui se durcit vers 1930, et la concurrence d'autres produits mettront fin à l'aventure.

LES AUTEURS



CÉCILE RAYNAL
pharmacienne, membre
de la Société d'histoire
de la pharmacie



THIERRY LEFEBVRE
maître de conférences
en sciences de l'information
et de la communication
à l'université Paris-Diderot

Pilules Orientales pour poitrine idéale

À la fin du XIX^e siècle, un nouveau remède apparut, promettant à ses utilisatrices « splendeur du buste et luxuriance des seins ». La mode, une bonne publicité et une législation du médicament très souple lui ont assuré un immense succès pendant plusieurs décennies.

En 1887, noyé au milieu d'une vingtaine d'autres réclames, un modeste entrefilet paraît en première page du n° 31 de L'Art de la Mode : « Beauté plastique de la femme acquise ou rendue par les Pilules Orientales. Les seules qui assurent en deux mois et sans nuire à la santé le développement des formes de la poitrine. Flacon avec notice : 5 francs contre mandat-poste Paris, Pharmacie Boisson, 100 rue Montmartre, Paris. » Les spécialités pharmaceutiques naissent, vivent et meurent, à l'instar des êtres vivants. Lancées dans un contexte socioculturel bien particulier, elles évoluent par la suite au gré de la mode, des modifications de législation et des contraintes commerciales. La destinée des Pilules Orientales, nées l'année même où débuta la construction de la tour Eiffel, en est un bel exemple.

Aujourd'hui, la quasi-totalité des médicaments vendus en officine de ville sont issus de l'industrie : on leur donne le nom de « spécialités pharmaceutiques ». Ces produits sont préparés à l'avance, présentés sous un

conditionnement particulier et caractérisés par une dénomination spéciale, décrite dans l'article L.5111-2 du Code de la santé publique. En préalable à toute commercialisation, ils doivent obtenir une « autorisation de mise sur le marché », qui découle des résultats de la batterie d'essais cliniques exigés par l'autorité de santé.

L'ÉPOQUE DES PRÉPARATIONS SUR MESURE

Face à cette hégémonie, les préparations magistrales et officinales ne constituent plus qu'une toute petite portion des produits délivrés au comptoir. Par « préparation magistrale », on entend tout médicament fabriqué extemporanément (c'est-à-dire en fonction du besoin), « selon une prescription médicale destinée à un malade déterminé » (article L.5121-1 du Code de la santé publique). Ces préparations sont réalisées en quelque sorte « sur mesure », soit directement dans le préparatoire de l'officine d'accueil, soit (et c'est aujourd'hui le plus souvent le cas) par une officine sous-traitante agréée, plus à même de se conformer

- aux bonnes pratiques de fabrication de plus en plus exigeantes.

L'époque est désormais bien loin où Monsieur Homais, le pharmacien d'Emma Bovary, passait le plus clair de son temps dans son « capharnaüm », un « véritable sanctuaire, d'où s'échappaient ensuite, élaborés par ses mains, toutes sortes de pilules, bols, tisanes, lotions et potions, qui allaient répandre aux alentours sa célébrité » (Gustave Flaubert, *Madame Bovary*, 1857).

Il est vrai que dans la seconde moitié du XIX^e siècle, la situation était tout l'inverse de ce qui prévaut de nos jours : l'essentiel de l'activité des pharmaciens et de leurs personnels consistait à exécuter des préparations magistrales en respectant la formulation des ordonnances médicales que leur adressaient les médecins. Ils disposaient à cet effet d'une vaste gamme de principes actifs et d'excipients répondant aux spécifications de la pharmacopée, et de tout le matériel nécessaire, des inévitables mortiers et pilons aux piluliers et autres moules à suppositoires. Les vieux ordonnanciers témoignent de cette activité foisonnante et si terriblement chronophage.

Les spécialités pharmaceutiques étaient, quant à elles, encore relativement peu nombreuses et plutôt mal vues par une profession très attachée à ses prérogatives et fière de son savoir-faire traditionnel. Les pharmaciens « spécialistes » (c'est comme cela qu'on appelait les fabricants de spécialités) étaient très minoritaires et la commercialisation de leurs produits restait l'apanage d'officines que d'aucuns qualifiaient de « commerciales ».

À partir des années 1880, cependant, le nombre des spécialités se mit à augmenter de manière sensible. Parmi les plus célèbres en cette fin de siècle, citons les Pastilles Géraudel, le Kola Astier, la Papaine Trouette-Perret, l'Eau Précieuse Dépensier, les Grains de Vals, la Colchicine Houdé, etc. Des noms dont nos aïeux étaient coutumiers.

NAISSANCE DES PILULES ORIENTALES

C'est dans ce contexte en cours de transformation que naquirent les Pilules Orientales. Leur créateur, le pharmacien parisien François Boisson, déposa le 12 juillet 1886 leur nom de fantaisie au greffe du tribunal de commerce de la Seine. L'enregistrement entérinait la naissance de cette nouvelle spécialité, de la même manière que la venue au monde d'un enfant est inscrite dans un registre d'état civil.

Les Pilules Orientales avaient une indication des plus curieuses : elles étaient destinées à « assurer le développement des seins et des formes de la poitrine de la femme ». Dès 1887, des entrefilets de quelques lignes en vantèrent les bienfaits dans la presse féminine. Et au



Les Pilules Orientales (ici une boîte datant d'environ 1956) étaient revêtues d'une feuille d'argent, destinée à rendre leur vue agréable, mais aussi à masquer leur amertume.

début des années 1890, ces réclames s'enrichirent de gravures représentant une jeune femme largement décolletée tenant dans sa main droite le précieux flacon. On pouvait y lire cette promesse alléchante : « Luxuriance des seins développés, reconstitués, embellis, raffermis en deux mois, par les Pilules Orientales, bienfaisantes pour la santé. »

Le succès rapide de cette nouvelle spécialité montre à quel point les stéréotypes féminins étaient écrasants en cette époque si particulière. Ce qui frappe lorsque l'on visionne les films réalisés par Georges Méliès et quelques autres au tournant du siècle, ce sont les silhouettes généreuses et terriblement corsetées des actrices qui venaient y esquisser quelques pas de danse ou poser dans un tableau vivant. Telle était en effet la « silhouette 1900 », comme la décrit en 1936 le médecin parisien Roger Montant dans un texte intitulé *Film documentaire sur les seins et la mode à travers les siècles* : « Seins projetés en avant, taille onduleuse et croupe [sic] avantageuse », à l'instar d'une danseuse de french cancan aux « appâts généreux ennuagés de dentelles et de rubans, toute légère et vaporeuse avec ses dessous froufrounants, ses colifichets et ses plumes ». C'était à l'évidence pour tenter de se conformer à ces modèles oppressants que certaines femmes succombaient aux promesses de transformation des Pilules Orientales.

La formulation de cette spécialité, qui a relativement peu varié au fil des décennies, présentait – il est vrai – quelques atouts : de la poudre de *Calamus aromaticus*, du pyrophosphate de fer citro-ammoniacal, du cumin ou du carvi (une plante herbacée qui ressemble au cumin), parfois de l'extrait de quassia ; et, par-dessus tout, de la poudre ou de l'extrait de *Galega officinalis*.



Jules Ratié, ici photographié dans les années 1940, n'avait que 26 ans en 1897, lorsqu'il acquit l'officine de François Boisson et les spécialités qu'il produisait, dont les fameuses Pilules Orientales. C'est lui qui mena ces petites pilules vers le succès.

Jusqu'à la fin 1899 figurait encore le nom du pharmacien Boisson sur le papier à en-tête de Jules Ratié, qui se présentait comme son successeur (ci-dessous). Le 31 août 1899, François Boisson envoyait ainsi encore des conseils hygiénodiététiques (reproduits ci-dessous) à l'une de ses clientes, visant à optimiser l'efficacité des Pilules Orientales. Systématiquement associés au traitement, ces conseils n'étaient sans doute pas étrangers à sa réussite, du moins certains...

À l'évidence, le pharmacien Boisson était un fin connaisseur de la pharmacopée de son temps!

La poudre de rhizome de *Calamus aromaticus*, une sorte de jonc originaire d'Asie centrale, possédait des propriétés fortifiantes et toniques. Quassia, cumin et carvi étaient connus pour leur action digestive. Quant au sel de fer, il était proposé, selon le fabricant, « sous une forme des plus assimilables »; il avait pour vocation d'augmenter la synthèse des globules rouges – vertu non négligeable pour des femmes souvent sujettes à l'anémie.

Mais l'élément le plus important était sans aucun doute le galéga, une plante à fleurs blanches en grappe. De longue date, cette herbacée avait été employée empiriquement en médecine populaire afin de favoriser la lactation. Durant le siège de Paris en 1870-1871, on aurait même administré un sirop à base de galéga, semble-t-il avec un certain succès, à

des nourrices dont le lait commençait à tarir. En juillet 1873, l'inspecteur de l'Enseignement primaire Jean-Jacques Gillet-Damitte soumit à l'Académie des sciences un mémoire vantant les propriétés nutritives et galactogènes de cette plante si commune dans le pourtour de la Méditerranée. Ses observations portaient certes sur des ruminants, mais pourquoi ne pas utiliser le galéga dans des pilules visant à redonner du galbe aux seins des femmes? La médecine était encore rarement fondée sur les preuves en ce temps-là et le pharmacien Boisson était assurément un homme pressé et entreprenant.

Le façonnage de ces pilules nécessitait un indiscutable tour de main: elles se présentaient en effet sous l'apparence de petites billes argentées brillant de mille feux, comme s'il s'agissait également de vendre du rêve aux clientes. Pour réussir cette fabrication, les petites sphères étaient légèrement humectées à l'aide d'une goutte de sirop, puis déposées dans une boîte sphérique contenant une mince feuille d'argent. Le préparateur imprimait alors à l'ensemble un léger mouvement circulaire. La moindre fausse manœuvre pouvait entraîner l'oxydation de la pellicule argentée et donc son noircissement! En revanche, quand les Pilules Orientales étaient réalisées suivant les règles de l'art, la féerie était au rendez-vous (voir la photo page ci-contre en haut).

VENTE PAR CORRESPONDANCE ET EXPORTATION

Le 1^{er} octobre 1897, François Boisson vendit son fonds de commerce à un tout récent diplômé de l'École supérieure de pharmacie de Paris, le Lotois Jules Ratié (voir le portrait page ci-contre). Par « fonds de commerce », il faut entendre l'officine du 100 de la rue Montmartre, mais également une cinquantaine de spécialités plus ou moins prospères, dont les Pilules Orientales constituaient en quelque sorte le fleuron. Deux ans plus tard, le jeune pharmacien revendit la boutique à un confrère, tout en gardant pour lui l'exploitation des marques les plus intéressantes: sa spécialité phare bien entendu, mais également d'autres produits aux noms pittoresques comme le Topique du Dr Blyn's et l'Exubérine.

Si François Boisson avait bien été l'« inventeur » des Pilules Orientales, Jules Ratié devait les élever au rang de *blockbuster*, avec l'aide d'un des plus habiles publicitaires de son temps: Jules Fortin, qui avait fait ses premières armes à la Compagnie générale de publicité John F. Jones et Cie, fondée en 1883 et en plein essor.

Pour élargir sa clientèle, l'entreprise privilégia la vente par correspondance. Nous avons vu que la majorité des pharmaciens d'officine se montraient plutôt hostiles aux spécialités à cette époque: pour se développer, il fallait donc

PHARMACIE SPÉCIALE
de Commerce
100, Rue Montmartre.
PARIS
J. RATIÉ
Successeur de Boisson
PHARMACIEN de 1^{re} CLASSE
Ex-interne des Hôpitaux

Paris, le 1/10/99

Notice pour Mademoiselle N. B.

Neuf heures de sommeil au maximum. Lever à 6 heures.
Une demi-heure après le lever, 2 verres d'eau de Marienbad source Kreutzbrunn, 1 verre matin et soir.
Trois quarts d'heure après le premier verre, premier déjeuner (si on ne peut s'en passer) avec un œuf à la coque, une tasse de thé et une petite flûte de pain.
De 9 à 11 heures promenade ou exercice.
À 11 heures déjeuner 2 plats de viande ou poisson, un légume et un dessert (fruits acidulés, salade, confit et compote pas ou peu sucrées). Une demi-bouteille de vin coupée d'eau et 2 petites flûtes de pain.
À 1 heure trois pilules et une cuillerée à soupe d'extrait fluide.
De midi à 6 heures exercices. Promenade à pied mais sans aller jusqu'à la fatigue.
À 6 heures dîner: un plat de viande froide, une compote, une demi-bouteille de vin et une flûte de pain.
Après le dîner promenade à pied.
À 8 heures, 3 pilules et une cuillerée d'extrait fluide.
À 9 heures coucher.
Pas d'aliments gras ou sucrés, pas de féculents, pas de sucre, peu de vin, boire le moins possible.
Si la soif est trop vive, se rafraîchir avec de la limonade peu sucrée.
Si les occupations ne permettent pas de se coucher avant minuit ou 1 heure, il faut reporter à cette heure-là le premier déjeuner du matin.

Produits Spéciaux
Hygiène de la Beauté
PILULES ORIENTALES
PILULES PERSANES
Lait des Antilles
GEMMES d'ŒILS
TRICOGENINE
Menthofrills
Collyre Venitien
Sève Dépurative
Pommade Adermatose
PILULES TONI PLASTIQUES

contourner cet obstacle pour l'heure irrédic-
tible. Par ailleurs, du côté des consommatrices,
la discrétion d'achat était de mise, car ce
remède engageait (et dévoilait d'une certaine
façon) leur sensualité et leur intimité. L'achat
au comptoir n'était donc pas forcément la meil-
leure option. En somme, la vente par corres-
pondance des Pilules Orientales arrangeait
tout le monde!

Lorsqu'une cliente souhaitait en acquérir
une ou plusieurs boîtes, il lui suffisait de passer
une commande qu'elle payait au moyen d'un
mandat-poste: elle donnait le montant néces-
saire au bureau de poste le plus proche de chez
elle, qui lui remettait en échange un mandat
libellé au nom de Jules Ratié ou de son labora-
toire. Lorsque ce dernier recevait le détail de
la commande accompagné du mandat, il
envoyait la marchandise à l'adresse indiquée
par la cliente et encaissait l'argent auprès de
son propre bureau de poste. Pour rassurer les
consommatrices, les publicités veillaient à pré-
ciser que l'envoi était « discret, sans marque
extérieure ».

UNE MONDIALISATION AVANT L'HEURE

Dans le même temps, le pharmacien décida
d'étendre la zone de chalandise par-delà les
frontières. Toutefois, le service postal interna-
tional n'étant pas, à l'époque, aussi performant
que celui de l'Hexagone, Ratié recourut à des
méthodes de vente plus classiques. Pour ce faire,
il s'appuya, avec son ami Fortin, sur les compé-
tences de l'Office national du commerce exté-
rieur, organisme d'État créé en 1898 et chargé
de donner aux industriels et négociants français
tous les renseignements pouvant concourir au
développement de leurs exportations.

L'Office fournissait par exemple une liste
de pharmacies étrangères susceptibles de
devenir dépositaires de spécialités françaises,
mais également les titres et adresses des jour-
naux parmi les plus lus dans chaque pays, leurs
tarifs publicitaires, les contacts des régies,
ainsi que divers règlements administratifs et
tarifs douaniers indispensables. Et c'est ainsi
que les Pilules Orientales se « globalisèrent »
avant l'heure!

Entre 1900 et 1913, de nombreux pays
furent touchés par l'expansion internationale
de l'entreprise Ratié: Belgique, Suisse, Italie,
Espagne, Allemagne, Pologne, Pays-Bas,
Autriche, Hongrie, Grande-Bretagne, Russie,
Turquie, Canada, Mexique, Cuba, Chili et
Argentine. Les publicités se déclinaient désor-
mais dans une foule de langues, si bien que leur
recensement exhaustif nécessiterait à coup sûr
plusieurs travaux de recherche: citons l'alle-
mand (« *Eine Schöne Büste durch die "Pilules
Orientales"* », soit « Un beau buste grâce aux
Pilules Orientales ») et l'espagnol (« *Hermoso*

*Pecho desarrollo, belleza y firmeza de los senos en
dos meses par las Pilules Orientales* », soit « Beau
développement de la poitrine, beauté et fer-
meté des seins en deux mois par les Pilules
Orientales »).

UNE ENTREPRISE FAMILIALE FLORISSANTE

Le succès des Pilules Orientales fut consi-
dérable. Pour s'en donner une vague idée, il
suffit d'énumérer quelques-unes des acqui-
sitions immobilières de la famille Ratié: outre
son appartement parisien de la rue du Château-
d'Eau, le pharmacien devint propriétaire d'une
superbe propriété dans le Loiret (le domaine
des Tourelles, à Marcilly-en-Villette, qu'il
transforma ultérieurement en exploitation
viticole) et d'une « minoterie à cylindres » (les
Grands Moulins de Maynard) à Bagnac-sur-
Célé, dans le Lot.

Mais les temps changeaient. Au fil des
décennies, les pouvoirs publics avaient pris

Splendeur du Buste
Développement, Fermeté de la Poitrine
par les
Pilules Orientales

Madame, voulez-vous avoir un buste aux formes harmonieuses, une gorge ferme et bien développée?

PRENEZ LES Pilules Orientales. Avec elles vous obtiendrez des résultats que ne pourraient vous donner des moyens externes, tels que : lotions, frictions et appareils quelconques, parce que le développement et le raffermissement des seins dépendent de conditions physiologiques tout internes, influençables seulement par des moyens internes.

LES Pilules Orientales font circuler un sang plus riche dans les régions mammaires et provoquent ainsi, d'une façon naturelle, le développement des seins ou leur rénovation.

Ne contenant aucune substance nuisible : arsenic ou autre, mais seulement des extraits de plantes fortifiantes, elles sont toujours bienfaisantes pour la santé et ne prédisposent pas à l'obésité.

Sous leur action vivifiante, les tissus se raffermissent, les "salières" disparaissent et la poitrine prend des proportions harmonieuses.

LES Pilules Orientales conviennent merveilleusement aux jeunes filles, aussi bien qu'aux dames, dont la poitrine est insuffisamment développée, ou a souffert par suite de fatigues ou de maladies.

LE SUCCÈS UNIVERSEL DES Pilules Orientales, qui date de plus de trente ans et va sans cesse croissant, est soutenu en outre par quelques imitateurs qui, de temps à autre, offrent aux dames des produits soi-disant analogues ou nouveaux. Qu'en ne s'y méprenne pas : les **Pilules Orientales** sont inimitables et sans rivales.

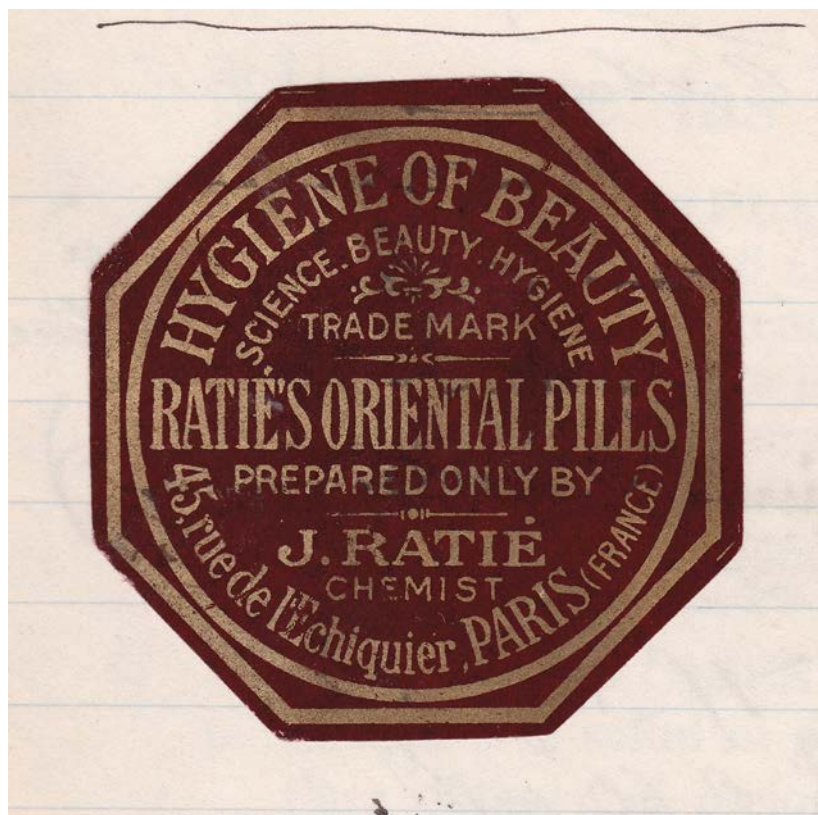
Rappelons que le traitement des **Pilules Orientales** ne comporte aucun régime sévère et qu'il est facile à suivre, en secret, à l'insu de tous.

Flac. avec notice 6'100 fr.
Contre remboursement 6'500.

J. RATIÉ, Ph^m, 5, Passage Verdeau (Faub^m Montmartre), Paris (9^e).
Dépôts à : **Bruxelles, Ph^m St-Michel, 15, Boul. du Nord.**
Genève, Drag, Carlier et Joris, 11, rue du Marché.
Milan, Dr Zambelli, 5, piazza S. Carlo.
Montréal (Canada), A. Dwyer, rue Ste-Catherine.

ÉDITEUR ATLAS

A partir des années 1890, les publicités pour les Pilules Orientales s'enrichissent d'illustrations montrant des femmes au décolleté plongeant, comme celle-ci, publiée vers 1910.



Dès les années 1900, les Pilules Orientales conquièrent de nombreux marchés en Europe et jusque sur le continent américain. Ci-dessus une étiquette anglaise vers 1930.

conscience du problème que posait le foisonnement des produits de santé. En 1925, on en comptait quelque 100 000 en France (médicaments, produits d'hygiène, accessoires, etc.), dont près de 20 000 spécialités pharmaceutiques, – les unes « commerciales » (comme les Pilules Orientales), les autres strictement « médicales », comme l'Eranol, un autre produit phare de l'entreprise, celui-là à base d'iode colloïdal. L'Eranol était en effet considéré comme un vrai médicament, indiqué pour traiter de réelles pathologies et non pour résoudre des désordres mineurs de l'apparence physique : « trouble de la croissance, lymphatisme, scrofule, pléthore, hypertension, artériosclérose, emphysème pulmonaire, rhumatismes chroniques, mycoses, sclérose auriculaire, infections aiguës, grippe, obésité, insuffisances thyroïdiennes, goitre, syphilis tertiaire, tuberculoses torpides, dermatoses et toutes les indications de l'iode », selon le prospectus qui l'accompagnait.

Les Pilules Orientales ne souffrirent pas trop de cette reprise en main, entre autres grâce à l'un des fils de Jules Ratié, Raymond, qui avait à son tour obtenu le diplôme de pharmacie. Il bénéficiait à la fois de l'énergie de sa jeunesse et d'une bonne connaissance des nouvelles pratiques pharmaceutiques. Ainsi, en juin 1931, les Pilules Orientales reçurent sans difficulté l'agrément du Laboratoire national de contrôle des médicaments, créé quelques

années plus tôt pour exercer un contrôle sur la profession. En revanche, le laboratoire ne sollicita évidemment pas un remboursement par les Assurances sociales, les ancêtres de l'Assurance maladie, nées en 1930, dans la mesure où il s'agissait de ce que nous appellerions de nos jours un « produit de confort ». En revanche, les deux formes de l'Eranol (gouttes et ampoules) en bénéficièrent.

UNE RUDE CONCURRENCE

Après la Seconde Guerre mondiale, le prestige des Pilules Orientales déclina rapidement. Il faut dire que les méthodes prétendant modifier l'apparence du buste foisonnaient : les unes mécaniques et pittoresques, mais très certainement inefficaces comme le Super-Massosein Roto-Star, commercialisé par la société lyonnaise Adams et Cie, ou le Super-Seins 33 des laboratoires Samep, censé procurer « un galbe et une fermeté idéale » ; les autres sans doute plus efficaces, mais parfois risquées comme les injections locales d'hormones féminines ou la chirurgie esthétique. Récemment encore, l'affaire des prothèses mammaires PIP (Poly Implant Prothèse), dont de nombreux exemplaires se sont révélés défectueux dans les années 2000 à cause de l'utilisation d'un gel non conforme à la place du gel de silicone classique, a démontré qu'aucune de ces pratiques n'est sans risque.

L'entreprise Ratié demeura familiale pendant plus d'un demi-siècle. Après le décès de Jules en 1952, son fils Raymond lui succéda. Il perdit finalement le contrôle de la société en 1956 et céda la concession des Pilules Orientales aux laboratoires Odilia en 1960. Ceux-ci les exploitèrent encore pendant une dizaine d'années, jusqu'à leur absorption par les laboratoires Thépenier, en 1971. Deux ans plus tard, les ventes des Pilules Orientales s'avérant décevantes, les laboratoires Thépenier arrêterent l'exploitation de cette spécialité presque nonagenaire. Quant à l'Eranol, il fut retiré du marché en 1967.

L'histoire médicale du galéga, l'ingrédient phare des Pilules Orientales, n'était cependant pas terminée pour autant. La recherche des produits chimiques qu'il contenait a révélé la présence de plusieurs substances aux vertus thérapeutiques. Parmi elles, le pharmacien et spécialiste de chimie végétale Georges Tanret a isolé en 1914 un alcaloïde nouveau, la galéguine, qui s'est révélée un puissant hypoglycémiant. Celle-ci est toujours extraite du galéga pour fabriquer des médicaments contre le diabète. D'autres études ont par ailleurs montré, dans les années 1960, la présence, dans le galéga, de principes actifs aux propriétés œstrogéniques, donc sources d'une activité potentielle sur les glandes mammaires... ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Raynal et T. Lefebvre, **L'Épopée des Pilules Orientales**, Le Square Éditeur, 2018.

M. del Carmen Francés Causapé et al., **Los Medicamentos del farmacéutico francés Jules Antoine Ratié**, Realigraf, 2016.

R

ENDEZ-VOUS

P.78 Logique & calcul
P.84 Idées de physique
P.88 Chroniques de l'évolution
P.92 Science & gastronomie
P.94 À picorer

LES MATHS AU PÉRIL DE LA CONTRADICTION

Risque-t-on de trouver au cœur des mathématiques une contradiction qui obligerait à tout revoir? Telle était la crainte de l'éminent mathématicien américain Edward Nelson.

L'AUTEUR



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



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

En 2006, Edward Nelson, qui était professeur au département de mathématiques de l'université de Princeton, aux États-Unis, fit circuler le texte d'une conférence intitulée « Warning signs of a possible collapse of contemporary mathematics » (« Signes inquiétants d'un effondrement possible des mathématiques contemporaines »). Il y indiquait trois points qui le persuadaient qu'un problème grave allait survenir au cœur de la reine des sciences.

Voyons le premier. Certaines contradictions trouvées en théorie des ensembles au début du xx^e siècle avaient été éliminées par une axiomatisation artificielle qui empêche, par exemple, de considérer l'ensemble de tous les ensembles. Cette solution axiomatique joue son rôle : la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel (ZFC), la forme encore aujourd'hui en vigueur de cette « réparation », n'engendre pas la moindre contradiction, semble-t-il. La théorie ZFC n'est cependant pas celle de Georg Cantor et de Gottlob Frege, qui avaient découvert la théorie des ensembles, ce cadre puissant permettant l'épanouissement des mathématiques modernes. Pour Nelson, cette impossibilité d'exprimer l'intuition initiale des ensembles était une première alarme.

Son deuxième sujet d'inquiétude était le second théorème d'incomplétude de Gödel, selon lequel une théorie ne peut pas prouver sa propre non-contradiction... On ne peut ainsi pas prouver la non-contradiction des théories mathématiques de base, comme l'arithmétique,

et cela suggérerait que ces théories sont contradictoires.

Le troisième indice de l'imminence d'une catastrophe en mathématiques était que nos théories permettent trop aisément de créer des nombres entiers tellement grands qu'ils n'ont plus aucun sens, et cela en particulier à cause de l'opération d'exponentiation, dont Nelson montrait qu'elle introduit des difficultés qu'il n'y a pas si l'on n'utilise que l'addition et la multiplication.

Nelson était un mathématicien éminent et respecté, qui a travaillé sur des sujets variés dont la théorie du mouvement brownien et les fondements des probabilités. Son inquiétude, même si elle a étonné, a jeté un trouble.

La situation s'est aggravée quand Nelson a publié en 2011 la première version d'un livre intitulé *Elements*, démarrant par : « Le but de ce travail est de prouver que les mathématiques contemporaines, en particulier l'arithmétique de Peano, sont contradictoires, puis de poser des fondations solides pour les mathématiques, et de commencer à bâtir sur ces fondations. »

L'ARITHMÉTIQUE, CONTRADICTOIRE?

Une théorie est contradictoire si elle permet, pour un énoncé E , de démontrer à la fois E et sa négation $\text{non-}E$. S'il y a une seule contradiction (E et $\text{non-}E$) dans une théorie, alors tous les énoncés qui ont un sens dans la théorie sont démontrables (voir l'encadré 4). Lorsqu'une théorie mathématique est contradictoire, tout y est à la fois faux et vrai : elle n'a donc aucun intérêt !

L'arithmétique de Peano auquel se référait Nelson est une théorie axiomatique des nombres entiers. Parmi ses axiomes, il y a celui du raisonnement par récurrence qui affirme: *Si une propriété $P(n)$ est vraie pour l'entier 0, et si, pour tout entier n , $P(n)$ entraîne $P(n+1)$, alors pour tout entier n , $P(n)$ est vraie.*

L'arithmétique de Peano démontre qu'il existe une infinité de nombres premiers. Elle permet aussi d'établir indirectement tout ce que l'on considère comme vrai des ensembles finis, par exemple que l'ensemble des parties d'un ensemble de n éléments contient 2^n éléments. L'arithmétique de Peano est l'outil de base pour développer toutes les mathématiques des structures finies.

La plupart des théories mathématiques permettent de répliquer les raisonnements de l'arithmétique de Peano, un noyau commun aux théories mathématiques. Trouver une contradiction dans l'arithmétique de Peano entraînerait qu'il n'existe pas de vérité mathématique!

OUF, NELSON S'EST TROMPÉ

La démonstration avancée par Nelson qu'il existe une contradiction dans l'arithmétique élémentaire est subtile et loin d'être élémentaire. Il utilise la notion de complexité de Kolmogorov, ainsi qu'une preuve du second théorème d'incomplétude de Gödel, proposée en 2010 par Shira Kritchman et Ran Raz.

Mais la démonstration de Nelson ne tient pas. Il n'a pas vraiment trouvé d'énoncé mathématique E telle que l'arithmétique élémentaire prouve à la fois E et non E . Examinée par divers mathématiciens dont le célèbre Terence Tao, détenteur de la médaille Fields, un point douteux de la démonstration de Nelson a été rapidement identifié. Il s'est révélé impossible à corriger. Nelson en a convenu. Temporairement, puisqu'en 2013, il proposa une nouvelle version de sa preuve... qui, heureusement, était de nouveau insatisfaisante, ce qu'il a de nouveau reconnu. Nelson a bien repris son travail, mais il est décédé en 2014, apparemment sans aboutir.

«IL Y A JUSTE UN POINT OÙ J'AI RENCONTRÉ UNE DIFFICULTÉ»

L'ambition de Nelson de trouver une contradiction grave était-elle déraisonnable? A-t-on déjà connu des situations où, tout à coup, au détour d'un raisonnement, on découvre qu'on vient de prouver la négation, non- E , d'un énoncé E qu'on avait démontré auparavant?

Il se trouve que oui, et il est intéressant de revenir sur les moments où tout a vacillé. Aux $XVII^e$ et $XVIII^e$ siècles, quand le calcul infinitésimal a été introduit, ses règles de calcul peu sûres permettaient de démontrer assez facilement que $0=1$! Aussi Michel Rolle et George Berkeley pensaient-ils qu'il fallait l'abandonner. Mais les choses se sont arrangées au XIX^e siècle. 

PARADOXES ET CONTRADICTIONS

1

Les mathématiciens s'intéressent aux paradoxes, car un paradoxe un peu modifié et transposé au sein d'une théorie peut devenir un outil de démonstration.

C'est le cas du paradoxe du menteur : si la phrase « Je mens » est vraie, alors ce que je dis en disant « Je mens » n'est pas vrai ; et si la phrase « Je mens » n'est pas vraie, alors je dis la vérité et la phrase « Je mens » est vraie. La version de cette phrase exprimée en théorie des nombres, « Je ne suis pas démontrable », est la clé du théorème d'incomplétude de Kurt Gödel, qui affirme que dans toute théorie assez riche et non contradictoire, on peut formuler des énoncés dont elle n'est capable de démontrer ni la vérité, ni la fausseté.

En 2010, un paradoxe qui n'avait jusque-là pas servi en mathématiques a été utilisé par Shira Kritchman et Ran Raz pour donner une nouvelle démonstration du second théorème d'incomplétude



de Gödel, selon lequel si une théorie est non contradictoire et assez puissante, alors elle est incapable de démontrer sa non-contradiction. Rappelons ce paradoxe auquel on laissera le lecteur réfléchir.

Le maître dit à sa classe : « Vous aurez une interrogation surprise la semaine prochaine, donc l'un des six jours entre lundi et samedi. » Les élèves raisonnent alors de la façon suivante : « L'interrogation ne peut pas avoir lieu samedi, car ce ne serait pas une

interrogation surprise. Arrivés vendredi matin, nous saurons donc que l'interrogation va avoir lieu. Elle ne peut donc pas survenir vendredi. De même, de proche en proche, elle ne peut avoir lieu ni jeudi, ni mercredi, ni mardi, ni lundi. » Le professeur donne son interrogation le mardi, et personne ne s'y attendait ; il a donc bien respecté sa promesse. Il y a là une contradiction avec le raisonnement des élèves, qui semble pourtant parfaitement correct.

2

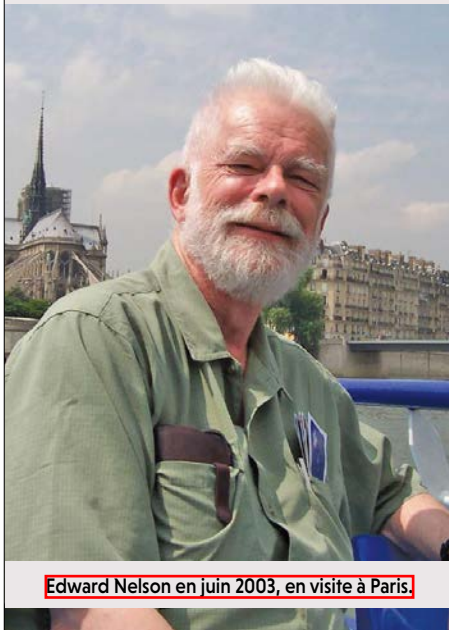
EDWARD NELSON,
L'ILLUSION DE L'INFINI DES NOMBRES

Edward Nelson (1932-2014) fut un mathématicien hors norme doté d'un esprit profond et original. Professeur à l'université de Princeton, il a travaillé en physique mathématique et proposa une version nouvelle de l'analyse non standard dénommée *Internal set theory*. En 2002, il expliquait comment il avait cessé de croire en l'existence des nombres (extrait de son texte *Mathematics and faith*) :

« Je dois raconter comment j'ai perdu ma foi en les nombres de Pythagore. Un matin de 1976, avant la réunion d'été de la Société américaine de mathématiques à Toronto, je me suis réveillé tôt. Tandis que je méditais sur les nombres, j'ai senti à un moment donné une présence accablante m'accusant d'arrogance, cela parce que je croyais en l'existence réelle d'un monde infini de nombres. Cela me laissa comme un bébé dans son berceau réduit à compter sur

ses doigts. Maintenant, je vis dans un monde où il n'y a pas de nombres, sauf ceux que les êtres humains construisent à l'occasion. La religion de Pythagore n'est plus pratiquée. Mais Pythagore a fortement influencé Platon, et nous-mêmes par son intermédiaire. Les nombres de Pythagore sont le type même des idées platoniciennes. [...] Sont-ils créés – contingents et sujets aux changements ? Sont-ils immuables et donc aujourd'hui comme ils l'étaient autrefois et pour toujours ? Ou s'agit-il de constructions de la pensée humaine qu'il est dangereux d'idolâtrer ? Pour nous autres hommes et femmes du monde de la recherche, réifier les idées abstraites, voire fonder la morale sur elles, est une tentation plus insidieuse et plus corruptrice que le serait le culte de statues de métal. »

Nelson défendait donc une conception prudente des mathématiques, qu'on nomme parfois formalisme : faire des mathématiques, c'est manipuler des symboles et des formules auxquels il ne faut pas accorder trop d'importance, et pour lesquels, surtout, il faut s'interdire d'imaginer qu'une réalité se cache derrière eux. La conception de Nelson le conduisit à penser que l'arithmétique élémentaire est contradictoire. Il passa la fin de sa vie à tenter de prouver que la théorie habituelle des nombres (l'axiomatique de Peano) ne tient pas debout. Il publia en 2011 une première version de sa démonstration, puis une seconde en 2013. Bien que très subtiles et menées avec soin, ces preuves se révélèrent incorrectes. Pour l'heure, personne n'a su trouver de contradiction dans la théorie des nombres, ni dans la théorie des ensembles telle qu'elle a été axiomatisée au début du xx^e siècle.



Edward Nelson en juin 2003, en visite à Paris.

Le second exemple de contradiction considéré comme grave a déjà été évoqué : il concerne la théorie des ensembles. L'histoire est remarquable, car la contradiction est survenue brusquement. Gottlob Frege, qui venait de relire les épreuves d'un livre, reçoit une lettre aimable de Bertrand Russell datée du 16 juin 1902. Celui-ci exprime son accord avec la façon de procéder de Frege pour traiter la logique. Il ajoute cependant : « Il y a juste un point où j'ai rencontré une difficulté... », et lui présente le problème de l'ensemble E des ensembles qui n'appartiennent pas à eux-mêmes. E appartient-il à lui-même ? En langage symbolique : $E = \{F \text{ tel que } F \notin F\}$. Est-ce que $E \in E$?

Si E appartient à E , $E \in E$, alors E n'a pas la propriété caractéristique des éléments de E ; donc E n'est pas élément de E , $E \notin E$. On a une contradiction.

Si E n'appartient pas à lui-même, $E \notin E$, alors il a la propriété caractéristique des éléments de E ; il est donc un élément de E : $E \in E$. On a encore une contradiction.

Ainsi, chacune des deux éventualités, $E \in E$ ou $E \notin E$, conduit à une contradiction.

On découvrit d'autres contradictions, dont celle concernant l'ensemble U de tous les ensembles. Chacune des parties (ou sous-ensembles) de U est un ensemble, donc un élément de U . Par conséquent, U a au moins autant d'éléments qu'il a de parties. Sa taille est donc au moins aussi grande que celle de l'ensemble de ses parties, ce qui entre en contradiction avec le résultat, dû à Cantor, que l'ensemble des parties d'un ensemble E est toujours de taille strictement supérieure à celle de E .

THÉORIE DES ENSEMBLES RÉPARÉE

Les mathématiciens du début du xx^e siècle ont su formuler une version axiomatique de la théorie des ensembles qui évite les contradictions en interdisant de considérer l'ensemble de tous les ensembles comme un véritable ensemble et en formulant diverses limitations sur ce qu'on peut définir comme ensemble. La théorie est débarrassée des contradictions, non pas parce qu'on démontre qu'il n'y en a pas, mais simplement parce qu'aujourd'hui personne n'a su proposer, pour un énoncé précis A , un raisonnement conduisant à A et un autre conduisant à non- A . Le cadre restrictif de l'axiomatique de ZFC, qui déplaisait à Nelson par ses aspects artificiels, fonctionne en pratique.

Cette remise sur pied de la théorie y restreint la liberté, mais pas d'une manière gênante pour les mathématiciens : ils s'y sentent au large et s'en satisfont, à de rares exceptions près.

D'autres situations dans l'histoire récente des mathématiques ont conduit à découvrir des contradictions dans des théories dont on aurait aimé pouvoir se servir sans risque, ce que

l'intuition qui leur donnait naissance laissait croire. Citons la logique combinatoire de Haskell Curry (1900-1982) et le lambda-calcul d'Alonzo Church (1903-1995), qui décrit un système de notations puissant pour les fonctions. Ces deux systèmes issus d'intuitions mathématiques, dont la fécondité et l'importance sont maintenant établies, conduisaient dans leur version initiale à des contradictions. C'est Stephen Kleene, un élève de Church (méfiez-vous de vos élèves...), qui découvrit en 1934, avec John Rosser, le pot aux roses. De nouveau, comme pour la théorie des ensembles, une légère restriction dans les systèmes a permis de les corriger et d'éviter, jusqu'à présent, qu'ils ne donnent des contradictions.

AJUSTEMENTS SUCCESSIFS

Un autre cas est celui du système logique de la « théorie constructive des types », devenu important en informatique, car il évite les situations où l'on prouve l'existence d'objets ayant une certaine propriété alors qu'on ne sait construire explicitement aucun objet ayant la propriété considérée. La première version de cette théorie, proposée en 1972 par le Suédois Per Martin-Löf, s'est révélée contradictoire,

obligeant là encore à corriger ce que l'intuition avait imaginé tenir debout.

Citons un dernier cas concernant les axiomes dits de « grands cardinaux », qui affirment l'existence d'ensembles très grands. Une multitude de principes ont été utilisés pour en définir, et il est admis que tout ce qui affirme que le monde mathématique est vaste doit être accepté : l'axiome de l'infini stipulant qu'il existe des ensembles infinis est le premier de cette catégorie. L'Américain Kenneth Kunen a cependant démontré en 1971 que ce maximalisme ensembliste n'est pas raisonnable au-delà d'un certain point, car certains axiomes de grands cardinaux, bien qu'aussi acceptables en apparence que d'autres, conduisent à une contradiction (en fait à une incompatibilité avec l'axiome du choix). Sans cette découverte, on aurait pu adopter une théorie des ensembles contradictoire.

Il faut noter que les cas que nous avons cités appartiennent tous à la même catégorie : on tente de formuler avec précision une théorie récente en cours d'élaboration en fixant ses axiomes ; on la fait fonctionner ; on découvre une contradiction ; on ajuste ; la contradiction disparaît.



DES INTUITIONS CONVERGENT ET SE RENFORCENT

3



Kurt Gödel (1906-1978)

Le second théorème d'incomplétude de Gödel indique que si un système non contradictoire est assez puissant pour mener les raisonnements arithmétiques habituels, alors ce système ne peut pas démontrer qu'il est non contradictoire.

Cela mit fin au projet de justifier l'usage de l'infini (comme la théorie des ensembles le permet) à l'aide d'une théorie qui ne l'utilise pas, ce qui était l'idée du programme de David Hilbert. Ce grand mathématicien souhaitait renforcer la confiance en l'usage de « l'infini actuel » (qui existe pleinement, maintenant) par opposition à « l'infini potentiel » (qui se construit petit à petit).

L'usage de l'infini actuel était devenu courant alors que les philosophes ont longtemps considéré qu'il fallait s'en méfier, et même le réserver à Dieu qui seul pouvait le comprendre. Hilbert rêvait de passer de la croyance très largement partagée que la théorie des nombres (sans infini actuel) est sans contradiction à l'affirmation que des théories plus fortes, telle la théorie des ensembles (avec infini actuel), le sont aussi. Le second théorème de Gödel montre que c'est impossible : une théorie ne pouvant justifier d'elle-même qu'elle est non contradictoire, elle ne peut a fortiori pas justifier la non-contradiction d'une théorie plus forte qu'elle.

Il faut cependant faire deux remarques. D'abord, qu'une théorie puisse démontrer sa propre non-contradiction n'est pas utile : une théorie contradictoire démontre tout ce qu'on veut, et donc aussi sa non-contradiction ! De plus, si on peut démontrer qu'une théorie *S* fondée sur des axiomes très généraux et puissants (c'est le cas de l'arithmétique de

Peano) est non contradictoire en n'utilisant qu'une faible partie de ce que permet *S* et un autre principe de raisonnement s'appuyant sur l'intuition, on gagne quelque chose. C'est le cas de la démonstration de la non-contradiction de l'arithmétique par Gerhard Gentzen en 1936 : elle met en œuvre un principe de raisonnement par récurrence un peu plus général que celui de l'arithmétique de Peano, mais est assez simple quand même. D'autres preuves de la non-contradiction de l'arithmétique ont aussi été formulées en se fondant sur des théories qui ne sont pas strictement plus faibles que celle de Peano (c'est impossible !), mais en ne mettant en action qu'un nombre limité de principes ou en n'utilisant que des concepts assez différents de ceux à la base de l'arithmétique de Peano.

On doit voir ces démonstrations comme des raisons cumulatives de croire que cette arithmétique est non contradictoire. Plusieurs cheminements de pensée, plusieurs bases différentes de concepts concourent à la conclusion que l'arithmétique de Peano n'est pas contradictoire ; on doit en être rassuré.

Aujourd'hui, les fondements proposés par Vladimir Voevodsky ne permettent pas plus que les fondements ensemblistes habituels utilisant l'axiomatique ZFC d'être certain que notre façon de développer les mathématiques ne conduira pas à des contradictions ; mais en adossant ces formalismes à d'autres intuitions de nature plus topologique, on renforce les raisons que nous avons de croire que les mathématiques n'aboutiront jamais à des contradictions.

On peut donc défendre que ces systèmes contradictoires sont apparus à propos d'idées que l'on n'avait pas encore bien testées, systèmes dont on n'a pas su mesurer immédiatement qu'ils étaient si puissants qu'ils donnaient des contradictions. En revanche, jamais une théorie bien installée, comme l'arithmétique de Peano, ne s'est trouvée dans cette situation.

Doit-on penser comme Nelson que cela n'est dû qu'à notre exploration insuffisante des systèmes que nous utilisons, et que si nous n'y prenons pas garde ils finiront par s'écrouler? Ou au contraire, doit-on, comme beaucoup de mathématiciens le soutiennent, affirmer que s'il y avait une contradiction possible dans les systèmes utilisés depuis longtemps, elle serait apparue, et donc que leur absence doit nous rassurer?

LA FÉCONDE INQUIÉTUDE DE VLADIMIR VOEVOVSKY

Un autre mathématicien prestigieux et détenteur de la médaille Fields, le Russe Vladimir Voevodsky (1966-2017), a craint aussi que les mathématiques ne soient pas assez bien protégées de la contradiction et de l'erreur. Il a par ailleurs défendu l'idée qu'il est devenu nécessaire de pratiquer les mathématiques d'une nouvelle façon.

Voevodsky était inquiet car son domaine de recherche, la géométrie algébrique, oblige à des démonstrations très longues et complexes, au point que plusieurs fois des erreurs se sont glissées dans des démonstrations et sont passées inaperçues durant des années. Lui-même a découvert, en retravaillant sur l'un de ses anciens articles, qu'il avait proposé une démonstration fautive. Après un gros travail, il a su

remettre sa preuve sur pied. Le plus inquiétant à propos de cette erreur est que plusieurs groupes de mathématiciens avaient travaillé en commun sur l'article erroné sans y repérer d'erreur. Il mentionna aussi le cas d'un article de son domaine où les chercheurs ont été obligés de remplacer un paragraphe faux de quelques lignes par trente pages, issues d'un effort des spécialistes s'étalant sur plus de cinq ans.

Voevodsky en était arrivé à la conclusion que dans sa spécialité, le système habituel de validation des démonstrations par les autres chercheurs du domaine n'était plus suffisant pour garantir la correction des travaux. Il écrivit: «Pour mener mon travail avec un niveau de rigueur et de précision que je pensais nécessaire, il aurait fallu un énorme effort de ma part et cela n'aurait produit que des textes très difficiles à lire. De plus, qui serait vraiment en mesure d'assurer que je n'ai rien oublié et que je n'ai laissé aucune erreur, puisque des erreurs relativement simples attendent des années avant d'être découvertes? Je pense que c'est à ce moment que j'ai arrêté de faire ce que j'appelais de la recherche conduite par la curiosité, et que je me suis mis à penser sérieusement au futur. Je n'avais pas les outils pour explorer ce vers quoi ma curiosité m'entraînait et que je considérais comme ayant de l'intérêt, de la valeur et de la beauté.»

Ses doutes sur la non-contradiction des théories habituelles, associés à son expérience avec les erreurs impossibles à maîtriser de son domaine de recherche, le conduisirent à imaginer une façon nouvelle d'écrire et de pratiquer les mathématiques. Pour reprendre le contrôle et assurer la rigueur des travaux mathématiques de son domaine, Voevodsky jugea indispensable que chaque point du développement d'une

LA CONTRADICTION UTILE: LE RAISONNEMENT PAR L'ABSURDE

4

Les mathématiciens évitent à tout prix les contradictions, sauf quand ils en utilisent la présence temporaire dans ce qu'on dénomme les « démonstrations par l'absurde ».

Rappelons-en le principe. Pour prouver une affirmation A, on commence par faire l'hypothèse inverse, non-A. On mène alors un raisonnement jusqu'à arriver à une contradiction, par exemple en démontrant A (le contraire de l'hypothèse faite). Le fait d'avoir obtenu une absurdité ne peut signifier qu'une chose : l'hypothèse initiale du raisonnement est fautive. Par conséquent, non-A est faux, donc A est vrai.

Par exemple, démontrons par cette méthode que « 36 n'est pas une puissance de 2 ».

Supposons le contraire, c'est-à-dire que « 36 est une puissance de 2 », donc que 36 est de la forme 2^n pour un certain entier n. En divisant par 2 chaque côté de l'égalité $36 = 2^n$, on obtient : $18 = 2^{n-1}$. On recommence : $9 = 2^{n-2}$. Nécessairement, $n - 2 \geq 1$, donc $9 = 2 \times 2^{n-3}$, où 2^{n-3} est un entier. Donc 9 est pair. C'est absurde.

On en tire la conclusion : « 36 n'est pas une puissance de 2 ».

Le raisonnement par l'absurde est très important en mathématiques. C'est par exemple lui que Georg Cantor a utilisé pour montrer que l'infini des nombres réels est strictement plus grand que l'infini des nombres entiers.

Le principe du raisonnement par l'absurde correspond à la formule logique :

$$(\text{non-A} \Rightarrow (\text{B et non-B})) \Rightarrow \text{A}$$

La crainte de la contradiction en mathématiques provient de la règle logique *ex falso quodlibet* : $(\text{B et non-B}) \Rightarrow \text{A}$. Elle signifie que dès qu'une seule contradiction est obtenue, tout est vrai.

On peut démontrer la règle *ex falso quodlibet* de plusieurs façons, mais le raisonnement par l'absurde constitue la plus simple : Si on a (B et non-B) , alors on a aussi $(\text{non-A}) \Rightarrow (\text{B et non-B})$ (car, quand X est vrai, on a $Y \Rightarrow X$ pour tout Y). Donc, d'après la règle du raisonnement par l'absurde, A est vrai. On a ainsi établi que partant de (B et non-B) , on obtenait A ; autrement dit, on a établi la règle *ex falso quodlibet*.

théorie, tant l'introduction de nouveaux objets que l'écriture des preuves, soit validé par un système informatique adapté. Des idées précises nouvelles sur la façon de mettre en œuvre cet objectif lui apparurent. Cela donna lieu à un programme de travail auquel il associa pendant un an une équipe de chercheurs réputés, dont le Français Thierry Coquant.

Le livre résultant de cette année de travail, *Homotopy Type Theory - Univalent Foundations of Mathematics*, est disponible gratuitement sur Internet (<https://homotopytypetheory.org/book/>). Il comporte une présentation de la logique particulière nécessaire au projet, la «théorie homotopique des types» (HoTT) et mène le développement d'une série de domaines mathématiques classiques et nouveaux en s'appuyant sur la nouvelle conception. Tout le contenu de l'ouvrage a été contrôlé par des outils informatiques.

La parution du livre a été saluée dans la communauté mathématique comme une révolution. Même si l'usage de cette méthode générale plus sûre pour faire des mathématiques n'a pour l'instant séduit qu'un petit nombre de chercheurs, l'approche proposée est vue comme une nouvelle façon de fonder et pratiquer des mathématiques. Se substituera-t-elle à la méthode habituelle s'appuyant sur la théorie des ensembles ou sur des systèmes mathématiques classiques tels que les axiomes de Peano? Il est probable qu'elle ne concernera dans un premier temps que les domaines les plus difficiles, comme celui à l'origine du projet de Voevodsky.

ASSISTANTS DE PREUVE

La méthode des assistants de preuve, des systèmes informatiques qui aident les mathématiciens à écrire tous les détails d'une démonstration et à les contrôler, a déjà obtenu de nombreux succès. Le système *Coq* développé en France par l'Inria (<https://coq.inria.fr>) est un tel système reconnu et utilisé dans de monde entier.

Les assistants de preuve ont permis la vérification définitive du théorème des quatre couleurs («Quatre couleurs suffisent pour colorier toute carte de façon que les pays frontaliers soient de couleur différente») et la confirmation, elle aussi définitive, de la justesse de la preuve de la conjecture de Kepler (relative au rangement optimal des sphères dans l'espace) par Thomas Hales. L'idée nouvelle est de changer définitivement la pratique mathématique, l'ordinateur et le mathématicien devenant associés comme deux frères siamois qui élaborent les mathématiques sans qu'il soit possible que des erreurs s'y glissent.

Cette nouvelle façon de faire des mathématiques ne résout cependant pas tous les problèmes de contradiction et d'erreur. Les assistants de preuve comme la méthode de

Voevodsky sont sujets à deux types de difficultés.

D'une part, le système logique qu'on programme dans l'assistant de preuve peut être contradictoire, auquel cas, avec l'accord de la machine, on arrivera à démontrer E et non-E. On ne s'interrogera pas sur la validité de la découverte d'une contradiction, mais il faudra quand même réparer le système. L'utilisation d'un tel outil aurait évité à Nelson son annonce injustifiée de la présence d'une contradiction en arithmétique, car sa prétendue découverte d'une contradiction n'aurait pas obtenu l'approbation de la machine.

PAS DE SOLUTION ULTIME

D'autre part, le programme de l'assistant de preuve peut comporter des bugs (erreurs de programmation). Bien sûr, tout est fait pour éviter cela. Parfois même, on vérifie la correction du programme de l'assistant de preuve avec un autre assistant de preuve. Pourtant, éliminer totalement le risque de bug est impossible, car même si le programme de l'assistant de preuve est parfait, ce qu'il produit dépend aussi du système d'exploitation des ordinateurs utilisés et des puces électroniques qui exécutent les calculs dans les niveaux profonds de la machine. Reste ainsi la possibilité que rien d'anormal n'apparaisse et que, silencieusement, un bug profond conduise à valider une preuve pourtant fausse. On diminue la probabilité que subsiste une erreur, mais on ne la réduit jamais à zéro.

Concernant la non-contradiction des systèmes tels que HoTT, des travaux récents de Michael Rathjen, de l'université de Leeds, en Grande-Bretagne, ont montré que ces systèmes sont «équi-consistants» à des systèmes logiques classiques. Cela signifie que les nouveaux systèmes produiront une contradiction si et seulement si les systèmes classiques équivalents en produisent.

Cette solidarité entre des systèmes anciens et les nouveaux est en définitive rassurante. Sans que cela soit une preuve de non-contradiction, cette force équivalente des systèmes s'appuyant sur des intuitions différentes rend de moins en moins probable que l'on trouve une contradiction dans l'un ou l'autre. Nelson a eu raison de rechercher des contradictions et raison de se tromper; cela nous rassure et s'ajoute aux autres motifs indirects que nous avons de croire que la façon dont nous pratiquons les mathématiques ne produira pas de contradictions. Que l'on utilise des assistants de preuve quand cela s'impose, ou que l'on continue à procéder comme autrefois par contrôles humains pour les domaines les plus simples, il ne semble pas en définitive que la reine des sciences soit sur le point de s'écrouler! ■

BIBLIOGRAPHIE

Documents divers sur Vladimir Voevodsky :
www.ias.edu/idea-tags/vladimir-voevodsky

T. Y. Chow, The consistency of arithmetic, *Math. Intelligencer*, 2018 (doi.org/10.1007/s00283-018-9837-z et <https://arxiv.org/pdf/1807.05641.pdf>).

A. Cantini et R. Bruni, Paradoxes and contemporary logic, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2017 (<https://stanford.io/2RRpvGD>).

E. Nelson, Elements, prépublication, 2015. (<https://arxiv.org/abs/1510.00369>).

J. Hamkins et al., Generalizations of the Kunen inconsistency, *Ann. Pure Appl. Logic*, vol. 163(2), pp. 1872-1890, 2012.

E. Nelson, Warning signs of a possible collapse of contemporary mathematics, dans M. Heller et W. H. Woodin (éds.), *Infinity : New Research Frontiers*, Cambridge University Press, 2011 (<https://web.math.princeton.edu/~nelson/papers/warn.pdf>).

S. Kritchman et R. Raz, The surprise examination paradox and the second incompleteness theorem, *Notices of the AMS*, vol. 57, pp. 1454-1458, 2010.

LES AUTEURS



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

VOLS D'ARAIGNÉES AU-DESSUS DES OCÉANS

Certaines araignées tirent profit de forces électrostatiques pour décoller et s'envoler. Elles voyagent ensuite au gré des vents, parfois sur des distances considérables.

Quand naît une île volcanique au milieu d'un océan, les araignées sont en général les premiers arthropodes terrestres à la coloniser. Elles atteignent de tels lieux grâce à l'entraînement des vents et aux fils de plusieurs mètres de long qu'elles ont tissés pour s'envoler.

DARWIN EN A ÉTÉ TÉMOIN

Comment expliquer ce vol ? On pressent depuis longtemps que deux mécanismes physiques sont en jeu : les forces aérodynamiques exercées par l'air et les forces électrostatiques dues au champ électrique atmosphérique. Des travaux récents ont éclairci leurs rôles respectifs et précisé la contribution, essentielle, de l'électrostatique.

Pour mieux saisir le phénomène, plongeons-nous dans le journal de l'illustre Charles Darwin, témoin de ce

phénomène lors de son grand voyage à bord du *Beagle*, de 1831 à 1836. Darwin relate que par un jour calme et clair, alors que la côte de la terre la plus proche, l'Argentine, était distante d'une centaine de kilomètres, le navire fut soudainement envahi, par la voie des airs, d'araignées de taille comprise entre 2 et 7 millimètres.

Le naturaliste anglais observa surtout les conditions de leur envol : les araignées rejoignent les sommets des objets sur lesquels elles crapahutent, relèvent leur abdomen vers le ciel, éjectent des soies longues de 2 à 3 mètres et décollent alors selon l'horizontale avec une rapidité incroyable.

Darwin nota que la légère brise et la convection de l'air peuvent expliquer le fait que le fil de soie s'élève et interpréta l'écartement en éventail des différentes soies tissées par une même araignée par une répulsion électrostatique. Il avait tout bon : il avait clairement identifié les deux mécanismes physiques en jeu.

Certaines araignées peuvent décoller rapidement, après avoir gagné l'extrémité d'une feuille et émis des soies longues de plusieurs mètres. De tels envols donnent parfois lieu à des « pluies » d'araignées.

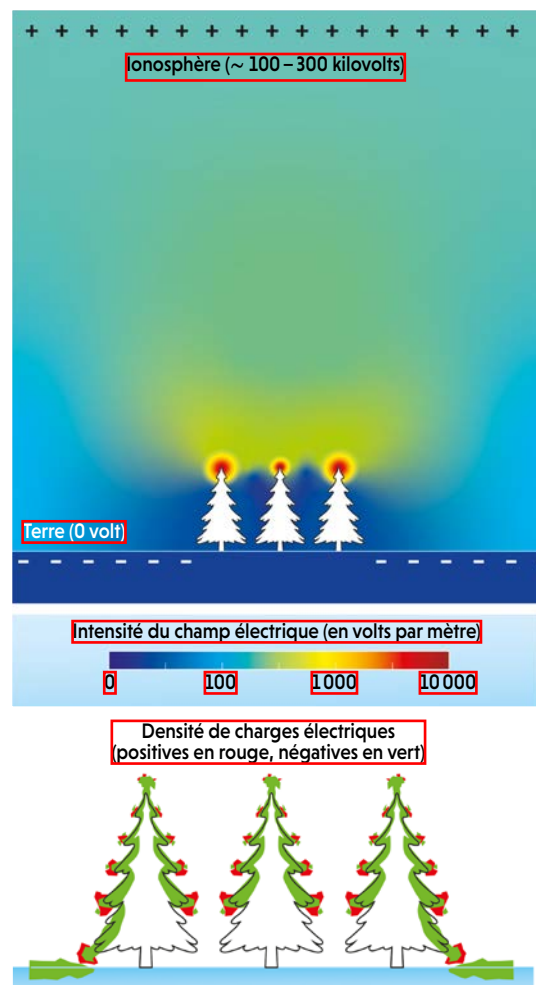


En effet, sans vent, point de voyage possible. On constate que les décollages ont lieu en général lors de légères brises, avec une vitesse du vent égale au plus à 3 mètres par seconde. À cause des turbulences atmosphériques, ces brises s'accompagnent de courants ascendants d'une fraction de mètre par seconde au niveau du sol.

Si l'on prend en compte le diamètre des soies, inférieur au micromètre (soit 100 fois moins qu'un cheveu), le nombre de Reynolds, qui exprime le rapport entre les forces d'entraînement dues au déplacement des masses d'air et les forces

ÉLECTRICITÉ ATMOSPÉRIQUE

L'ionosphère, entre 60 et 100 kilomètres d'altitude, est une couche atmosphérique chargée positivement. Son potentiel électrique, par rapport au sol, est de l'ordre de 100 à 300 kilovolts. Il en résulte un champ électrique atmosphérique qui est maximal au niveau du sol aux environs d'une centaine de volts par mètre. Mais la présence d'objets tels que des arbres peut apporter à ce champ de fortes distorsions locales, surtout à leurs extrémités. C'est grâce à ces champs électriques relativement intenses, et aux densités de charges électriques assez élevées qui en résultent près des surfaces pointues, que les araignées décollent facilement de leur support et volent à des altitudes pouvant atteindre quelques kilomètres.



d'entraînement par viscosité, est de l'ordre de 0,01. C'est par conséquent la viscosité qui domine; la force correspondante est proportionnelle à la vitesse relative entre le fil et l'air et, très grossièrement, à la longueur de la soie. Avec une soie de 1 mètre et une vitesse ascendante de l'air égale à 0,1 mètre par seconde, la force est d'environ 1 micronewton, soit le poids de 0,1 milligramme. Quelques dizaines de soies suffisent dans ce cas à soulever les araignées les plus petites, de 5 milligrammes ou moins.

Certes, plus loin du sol, les vents ascendants sont un peu plus forts, et avec des

vitesses de quelques mètres par seconde, ils suffiront pour que des araignées pesant plusieurs dizaines de milligrammes restent en l'air sans tomber. Mais comment expliquer leur décollage? Et pourquoi les araignées de Darwin décollaient-elles à l'horizontale bien plus rapidement que la brise ambiante, ce qui est paradoxal?

DANS L'AIR ÉLECTRIQUE

La réponse à ces questions réside vraisemblablement dans l'électrostatique. Les phénomènes atmosphériques entretiennent en effet un champ électrique dans lequel nous baignons en

permanence. La foudre en est l'une des manifestations les plus spectaculaires; mais même par temps calme et clair, il règne un champ électrique. Son amplitude est de l'ordre de 120 volts par mètre au-dessus d'un champ labouré, plat et horizontal. Ce n'est cependant qu'une valeur moyenne et la présence d'une structure conductrice peut renforcer

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



considérablement ce champ électrique par effet de pointe. Il en est ainsi des arbres : avec leur forte proportion d'eau et d'électrolytes, ils sont suffisamment conducteurs pour être au même potentiel électrique que le sol. Il en résulte l'accumulation de charges aux extrémités des branches et des feuilles, qui créent de forts champs électriques (voir l'encadré page précédente). Ainsi, à 10 mètres au-dessus du feuillage d'un arbre isolé haut de 35 mètres, on mesure des champs de 2 kilovolts par mètre, et au niveau du feuillage lui-même la dizaine de kilovolts par mètre.

Le champ électrostatique est donc bien présent dans l'environnement forestier où vivent les araignées. Mais ces bestioles et leurs soies sont-elles pour autant chargées ? On peut faire une première estimation de la charge des soies en observant leur éventail et en considérant l'effet de deux forces électrostatiques : d'une part, la force vers le haut due au champ électrique atmosphérique et proportionnelle à la charge de la soie, d'autre part la répulsion entre les soies, proportionnelle au carré de cette charge (le produit des charges de deux soies).

Lorsque la charge augmente, la répulsion entre soies croît plus vite que la force qui les aligne parallèlement et l'éventail des soies s'ouvre plus. Avec un angle observé de 1 radian (57 degrés) pour un éventail de 5 soies longues de 1 mètre soumis à un champ électrique de 120 volts par mètre, on calcule une charge totale de 1 nanocoulomb.

DES CHAMPS ÉLECTRIQUES INTENSES PAR ENDROITS

Cette charge permet-elle d'assurer la suspension en l'air de l'araignée ? Le champ électrique exerce sur elle une force de 0,1 micronewton, soit le poids d'une masse de 0,01 milligramme. Avec 100 soies, on atteint 0,2 milligrammes, toujours pour une centaine de volts par mètre.

Or au-dessus d'un arbre, le champ électrique est 10 à 100 fois plus intense que cette valeur. Il peut donc tout à fait soulever des araignées de plusieurs dizaines de milligrammes, si elles émettent plusieurs dizaines de soies de plusieurs mètres.

Dans ce cas, la charge des soies peut dépasser 10 nanocoulombs, ce qui est considérable pour un animal aussi petit. Les propriétés électriques de la soie (capacité, résistance) montrent cependant que cette charge est atteinte en quelques secondes (une durée compatible

LÉVITATION ÉLECTROSTATIQUE

Les forces électrostatiques permettent à des araignées de s'envoler, mais aussi de faire léviter des objets macroscopiques. Il existe ainsi un jouet constitué d'une baguette « magique » et d'une structure faite de bandes souples d'un matériau léger et conducteur, celle-ci étant mise en lévitation par la baguette. Le principe est simple : une pile permet de charger électriquement la baguette, que l'on met ensuite au contact de la structure ; celle-ci acquiert donc des charges électriques de même signe que la baguette.

Grâce à la répulsion entre charges de même signe, la structure se déploie, tandis que la répulsion exercée par la baguette compense son poids.



avec les observations) sous des courants de quelques nanoampères et des tensions de quelques centaines de volts, valeurs qui ne présentent pas de danger pour l'arachnide.

Pour en revenir aux observations de Darwin, un calcul du champ électrique à bord d'un navire tel que le *Beagle* montre que la présence de parties conductrices verticales et hautes (telles que le mât) crée au niveau du bastingage un champ électrique horizontal 3 à 4 fois plus intense que le champ ambiant, soit plusieurs centaines de volts par mètre. La force électrostatique correspondante était donc à la fois importante et plutôt horizontale, d'où cette inattendue accélération des araignées au décollage, indépendante de la vitesse de la brise.

Comment être certain du rôle de l'électrostatique ? Il conviendrait de mesurer les charges portées par les araignées, mais cela semble très délicat. Alors Erica Morley et Daniel Robert, de l'université de Bristol, ont en quelque sorte interrogé les araignées elles-mêmes. Leurs expériences récentes ont révélé que quand un champ électrique assez fort apparaît, les araignées volantes émettent une ou plusieurs soies et dressent leur abdomen. Cette dernière position n'est adoptée par l'araignée que lorsqu'elle cherche à s'envoler. Autrement dit, les araignées sont bien sensibles au champ électrique et ne se préparent à l'envol que lorsque le champ est suffisant. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. L. Morley et D. Robert, **Electric field elicits ballooning in spiders**, *Current Biology*, vol. 28, pp. 2324-2330, 2018.

D. Clarke et al., **The bee, the flower, and the electric field : electric ecology and aerial electroreception**, *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 203, pp. 737-748, 2017.

P. W. Gorham, **Ballooning spiders : the case for electrostatic flight**, prépublication Arxiv, 2013 (<https://arxiv.org/pdf/1309.4731.pdf>).

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

**DURÉE
LIBRE**

**3 FORMULES
AU CHOIX**

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	4,90€ PAR MOIS	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**

PAG19STD

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

☐ FORMULE DÉCOUVERTE 12 n° du magazine papier 4,90€ PAR MOIS -29 % DPV4E9U	☐ FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE 12 n° du magazine papier 4 Hors-série papier 6,50€ PAR MOIS -31 % PPV6E5U	☐ FORMULE INTÉGRALE 12 n° du magazine papier 4 Hors-série papier Accès illimité aux contenus en ligne 8,20€ PAR MOIS -43 % PV8E2U
--	--	---

2 / Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tél. :

E-mail :@.....
(indispensable pour la formule intégrale)

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

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

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

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

Partie réservée au service abonnements. Ne rien inscrire

L'AUTEUR



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

QUAND LES PROTÉINES TRAVAILLENT AU NOIR

**Une protéine remplit-elle une unique fonction biologique?
La spécialisation biochimique des enzymes l'a longtemps laissé
croire, jusqu'à ce que des protéines du cristallin révèlent
l'existence de nombreuses activités clandestines...**

Dans les années 1980, les cristallines ont levé le voile sur un monde inattendu dont l'exploration se poursuit encore aujourd'hui. Ces protéines sont les principaux constituants du cristallin de l'œil de nombreux animaux, vertébrés ou non. On les pensait remarquables à cause de leurs étonnantes caractéristiques optiques: elles sont transparentes aux rayons lumineux du spectre visible et donnent au cristallin un indice optique supérieur à 1, ce qui lui confère le rôle de lentille convergente. De plus, elles ne se dénaturent pas à forte concentration et présentent une longue durée de vie. Heureusement, car à la fin de l'embryogenèse du cristallin, les cellules qui le constituent perdent leurs noyaux et les protéines ne se renouvellent quasiment plus.

De telles protéines si particulières semblaient spécialisées pour un unique

rôle. Leur étude paraissait fascinante tant d'un point de vue fondamental (comment sont-elles apparues?) qu'appliqué (peut-être aideraient-elles à comprendre la cataracte, due à l'opacification du cristallin?). Aussi, quelle ne fut pas la surprise de Joram Piatigorsky, de l'Institut américain de la santé à Bethesda, quand il se rendit compte, à la fin des années 1980, que les cristallines qu'il analysait n'étaient autres que des enzymes bien connues par ailleurs, exprimées à un niveau moindre dans de nombreux tissus où elles ne pouvaient jouer un rôle optique!

DE VULGAIRES CHAPERONS, RIEN DE PLUS

On compte plus d'une douzaine de familles de cristallines chez les seuls vertébrés. Joram Piatigorsky a montré que les premières découvertes, les cristallines α des vertébrés, étaient des protéines de choc thermique, ou HSP (pour



Comme ceux des vertébrés, les yeux de ce mollusque ont un cristallin constitué principalement de longues cellules fibreuses transparentes sans noyau, contenant surtout des cristallines.



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

EN CHIFFRES

370

La base MoonProt 2.0 a jusqu'à présent répertorié 370 protéines travaillant au noir, tous organismes confondus.

90 %

Dans le cristallin, les protéines représentent 20 à 60 % du poids frais des cellules. Parmi ces protéines, 90 % sont des cristallines.

12

Dans les organes autres que le cristallin, les cristallines remplissent leur fonction première de chaperons en s'assemblant en larges structures de 12, voire 24 molécules. Ces structures sont souvent des sphères ou des tores avec une cavité interne.



Ses tentacules sensoriels sont sensibles aux molécules émises par ses prédateurs, telles les étoiles de mer.

Chez ce mollusque et autres bivalves, chaque œil fonctionne comme un minuscule télescope : c'est un miroir concave multicouche qui focalise la lumière sur la rétine, située entre le cristallin et le miroir. Le cristallin n'a qu'un faible pouvoir réfractant et intervient peu dans la vision.

Comme les coquilles saint-jacques, les pétoncles blancs ont en moyenne 40 yeux et peuvent en avoir jusqu'à 200, répartis tout le long de leur manteau.



Pétoncle blanc
(*Aequipecten opercularis*)
Taille : jusqu'à 90 mm

l'anglais *heat-shock proteins*). Ces enzymes, qui s'activent sous l'effet d'un stress cellulaire, jouent principalement un rôle de chaperon : elles empêchent que les protéines en cours de synthèse s'agrègent *via* leurs acides aminés hydrophobes, avant leur repliement tridimensionnel. Elles sont aussi exprimées lorsque la cellule subit de fortes variations de température qui entraînent la dénaturation des protéines. Ici encore, en tant que chaperons, elles aident ces protéines à garder leur structure tridimensionnelle, et donc à jouer correctement leur rôle biologique. On comprend que toutes les cellules nécessitent la présence de ces HSP, et que ce rôle de

chaperon n'a rien à voir, *a priori*, avec un quelconque rôle optique.

Par son travail pionnier sur les cristallines, Joram Piatigorsky venait donc de découvrir le deuxième rôle majeur des protéines de choc thermique chez les mammifères. Les biochimistes ont tout d'abord été très déçus de ce résultat imprévu : comment se faisait-il que des protéines si banales, que l'on retrouvait dans toutes les cellules eucaryotes (les cellules comportant un noyau) puissent aussi jouer un rôle optique si spécifique ? Pourtant, d'un point de vue évolutif, ce résultat est fascinant, car il illustre l'un des concepts les plus délicats à manipuler, celui de l'adaptation.

⊠ L'adaptation au sens strict peut être définie comme l'élaboration d'un nouveau trait sous l'effet de la sélection naturelle. Par exemple, chez les poissons plats pleuronectiformes, tels le turbot commun et la sole commune, qui se camouflent en se plaquant au sol, l'œil du côté aveugle migre lors de l'embryogénèse de l'animal: l'évolution a sélectionné ce nouveau trait, qui augmentait la valeur sélective de ces poissons.

Mais le problème devient crucial quand le caractère semble apparaître *de novo*, comme, par exemple, la plume de l'aile d'oiseau, car il est alors tentant d'y voir une finalité: une apparition soudaine laisse supposer que les forces en œuvre ont agi suivant un objectif précis, ce qui est impossible à admettre suivant la théorie de l'évolution et son jeu de mutation/sélection. Mais on sait maintenant que la plume existait déjà chez des dinosaures inaptes au vol. Elle leur servait très vraisemblablement de protection thermique, comme le poil chez les mammifères. De ce fait, la question n'est plus: «Comment la plume est-elle apparue?», mais «Comment la plume a-t-elle pu changer de fonction, à savoir passer de la protection thermique à la structuration d'une surface alaire?» C'est ce que les paléontologues américains Stephen Jay Gould et Elisabeth Vrba ont appelé en 1982 l'exaptation – l'acquisition, par des caractères déjà existants, de nouvelles fonctions.

TRANSPARENTES PAR HASARD

Le raisonnement sur les cristallines s'est construit de manière analogue. Le premier étonnement a consisté à se demander comment une protéine si exceptionnelle, avec des propriétés physiques si particulières, a pu apparaître, tant la probabilité que cela se produise est faible. Le deuxième étonnement tient au fait que ces propriétés (transparence, résistance, etc.) sont l'apanage de très nombreuses protéines d'une grande banalité. Car, outre les HSP, des enzymes classiques du métabolisme intermédiaire (l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent dans les cellules), comme la lactate déshydrogénase, l'arginosuccinate lyase ou l' α -énolase présentent aussi ces propriétés. Par quel mécanisme en est-on arrivé là?

Lors de la structuration du système photorécepteur de l'œil, des protéines ayant les caractères de cristallines ont été non pas inventées, mais recrutées dans la batterie des protéines déjà existantes. Par coïncidence, des enzymes étaient dotées de propriétés de transparence qui, alors,

n'avaient aucune utilité biologique. Elles ont été recrutées par sélection naturelle, sans que leur rôle ancestral ne soit abandonné. C'est typiquement de l'exaptation.

À l'échelle moléculaire, d'autres termes sont utilisés. Pour les protéines, les biochimistes américains comme Constance Jeffery, de l'université de l'Illinois à Chicago, disent qu'elles «travaillent au noir» (*moonlighting proteins*), illustrant par là qu'elles ont un métier affiché (leur rôle d'enzyme) et qu'elles en jouent secondairement un autre, de manière discrète (leur rôle de cristalline). En 2014, l'équipe de Constance Jeffery a lancé la base MoonProt 2.0, qui répertorie les protéines travaillant au noir et leurs fonctions secondaires (voir l'encadré ci-dessus). Et pour nommer les gènes associés à ces protéines, Joram Piatigorsky a forgé le terme de partage de gène (*gene sharing*), étant donné qu'un même gène code une protéine qui peut présenter deux fonctions distinctes, comme si ces fonctions se partageaient le même gène.

Mais n'y aurait-il pas une relation cachée entre la première fonction enzymatique et la deuxième fonction de cristalline? L'étude des systèmes visuels des mollusques permet d'avancer une hypothèse. En effet, les principales cristallines des lentilles des yeux de calmar et de coquille saint-jacques sont des glutathion-S-transférases, des protéines dont le rôle premier est de détoxifier la cellule en la débarrassant de substances xénobiotiques, c'est-à-dire qui lui sont étrangères. Ainsi, chez les vertébrés comme chez les mollusques, les protéines choisies ont comme fonction ancestrale de favoriser l'intégrité cellulaire. N'est-ce pas avantageux d'avoir en grande concentration des molécules protectrices? ■

UN CASSE-TÊTE MÉDICAL

De nombreuses protéines travaillent au noir, comme le montre la base de données MoonProt 2.0, lancée en 2014 pour les répertorier. La complexité de la cellule est donc plus grande que prévue, car les fonctions secondaires des protéines introduisent des interactions moléculaires totalement inattendues. Ainsi, une enzyme telle que la GAPDH intervient de manière intracellulaire dans la glycolyse, mais aussi à la surface des cellules comme récepteur d'une protéine qui transporte du fer, la transferrine. Des rôles aussi distincts et aussi importants nécessitent des régulations complexes : comment réguler la quantité de molécules de GAPDH extracellulaires sans influencer sur le nombre de molécules intracellulaires ? Or de nombreuses protéines travaillant au noir sont corrélées avec des maladies. Il arrive qu'une mutation affecte une fonction, mais pas l'autre, par exemple.

On connaît aussi des cas où une mutation induit une nouvelle fonction imprévue.

De nombreuses protéines travaillant au noir sont ainsi impliquées dans des maladies auto-immunes, des maladies cardiaques, l'obésité, des diabètes, des cancers... Il est évident que choisir une telle protéine comme cible thérapeutique peut avoir des effets désastreux si la deuxième fonction est inconnue. Ainsi, la base de données MoonProt 2.0, au départ à visée fondamentale, est maintenant développée en vue d'applications médicales.

BIBLIOGRAPHIE

C. Chen et al., **MoonProt 2.0 : an expansion and update of the moonlighting proteins database**, *Nucleic Acids Res.*, vol. 46(D1), pp. D640-D644, 2018.

C. J. Jeffery, **Protein moonlighting : what is it, and why is it important ?**, *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 373, article 20160523, 2017.

C. Slingsby et al., **Evolution of crystallins for a role in the vertebrate eye lens**, *Protein Science*, vol. 22, pp. 367-380, 2013.

J. Piatigorsky, **Evolution of mollusc lens crystallins : Glutathione S-transferase / S-crystallins and aldehyde dehydrogenase / O-crystallins**, *Amer. Malac. Bull.*, vol. 26, pp. 73 - 81, 2008.



**38 GRANDS TITRES
DE PRESSE**

**À PRIX UNIQUE
ET IMBATTABLE!**

**Jusqu'à
-77%
de remise**

BULLETIN D'ABONNEMENT ETUDIANT

1. COCHEZ LE OU LES ABONNEMENTS QUE VOUS CHOISISSEZ

ACTUALITÉ INTERNATIONALE

- ☐ **America** | Trimestriel | 4 n°
☐ **Courrier international** | Hebdomadaire | 30 n°
☐ **Le Monde diplomatique** | Mensuel | 12 n°
☐ **Time** | Hebdomadaire | 35 n°
☐ **Vocabulaire** | Bimensuel | 21 n° + 1 hors-série
☐ Anglais ☐ Allemand ☐ Espagnol
 (cochez l'édition choisie)

ACTUALITÉ GÉNÉRALE

- ☐ **Alternatives Economiques** | Mensuel | 11 n°
☐ **Le 1** | Hebdomadaire | 39 n°
☐ **Le Monde Sélection hebdomadaire**
 Hebdomadaire | 39 n°
☐ **L'Obs** | Hebdomadaire | 26 n°
☐ **Politis** | Hebdomadaire | 18 n°
 + web illimité + 1 hors-série en version numérique
☐ **Society** | Bimensuel | 24 n°

SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

- ☐ **Cercle Psy** | Trimestriel | 8 n°
☐ **Cerveau & Psycho** | Mensuel | 8 n°
☐ **Histoire & Civilisations** | Mensuel | 11 n°
☐ **La Revue Urbanisme** | Trimestriel | 6 n°
☐ **Philosophie magazine** | Mensuel | 8 n°
☐ **Population & Avenir** | Bimensuel | 7 n°
☐ **Sciences Humaines** | Mensuel | 11 n°

DÉBATS

- ☐ **Études** | Mensuel | 6 n°
☐ **Futuribles** | Bimestriel | 3 n°
☐ **La Revue des Deux Mondes** | Mensuel | 6 n°
☐ **L'Economie politique** | Trimestriel | 6 n°
☐ **Socialter** | Bimestriel | 7 n° + 1 hors-série

SCIENCES

- ☐ **Pour la Science** | Mensuel | 8 n°
☐ **Sciences et Avenir** | Mensuel | 12 n° + 4 hors-séries
☐ **Science & Vie** | Mensuel | 15 n°

ARTS & CULTURE

- ☐ **Beaux Arts magazine** | Mensuel | 10 n°
☐ **Grande Galerie** | Trimestriel | 8 n°
☐ **Ideat** | Bimestriel | 10 n°
☐ **L'éléphant** | Trimestriel | 3 n°
☐ **Les Inrockuptibles** | Hebdomadaire | 26 n°
☐ **Papiers** | Trimestriel | 4 n°
☐ **Polka** | Trimestriel | 9 n°
☐ **Télérama** | Hebdomadaire | 21 n°

MODE DE VIE & SPORT

- ☐ **Kaizen** | Bimestriel | 8 n°
☐ **So Foot** | Mensuel | 10 n°
☐ **Sport & Vie** | Bimestriel | 6 n° + 2 hors-séries
☐ **The Good Life** | Bimestriel | 10 n°

2. TOTAL DE MA COMMANDE

- ☐ 1 abonnement → 39 €
☐ 2 abonnements → 69 €
☐ 3 abonnements → 99 €
☐ autre (30 € par abonnement supplémentaire)
 soit _____ abonnements → Total _____ €

3. MES COORDONNÉES - Merci d'écrire en majuscule

☐ M ☐ Mme Nom _____
 Prénom _____
 Adresse (France métropolitaine seulement) _____

Code Postal _____ Ville _____

Email _____

J'accepte de recevoir par e-mail des offres de Rue des Etudiants ☐ oui ☐ non
 J'accepte de recevoir par e-mail des offres des partenaires de Rue des Etudiants ☐ oui ☐ non

4. JE RÈGLE LA SOMME DE

☐ 39€ ☐ 69€ ☐ 99€ ☐ autre montant _____ €
 par : ☐ Chèque à l'ordre de Rue des Etudiants ☐ CB ☐ Visa ☐ Mastercard
 N° _____

Date d'expiration _____

Cryptogramme (Les 3 derniers chiffres au dos de votre carte) _____

Date et signature obligatoires : _____

En retournant ce formulaire, vous acceptez que Rue des Etudiants, responsable de traitement, utilise vos données pour les besoins de votre commande, de la relation Client et d'actions commerciales. Pour connaître les modalités de traitement de vos données et d'exercice de vos droits (accès, rectification, effacement, opposition, portabilité, limitation des traitements, sort des données après décès), consultez notre politique de confidentialité à l'adresse <http://www.ruedesetudiants.com/> ou écrivez à notre DPO - 80 bd Auguste Blanqui - 75013 Paris ou dpo@groupelemonde.fr.

Je certifie être étudiant(e) _____ Année d'étude _____
 Filière _____

Offre valable jusqu'au 30 juin 2019

Abonnez-vous encore plus vite sur ruedesetudiants.com

L'AUTEUR



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

FAIRE UNE LIAISON À L'ŒUF DUR

Pour réaliser des sauces émulsionnées chaudes ou froides, des tensioactifs sont nécessaires. L'œuf peut en fournir, même s'il est dur.

Des idées floues se propagent parfois depuis des siècles dans les cuisines sans que l'on soit toujours assuré de leur véracité. Les expériences ont notamment réfuté l'idée que les œufs et l'huile devaient être à la même température quand on fait une mayonnaise, mais les incertitudes restent très nombreuses.

Par exemple, peut-on lier une sauce à l'aide d'œuf dur? On trouve dans *Les Dons de Comus*, de 1642, une «sauce au petit-Maitre»: «Faites infuser deux gousses d'ail dans une chopine de quinte-essence, ou consommé, avec une poignée de cerfeuil en branche. Passez à l'étamine. Pilez dans le mortier deux jaunes d'œuf durs, avec quelques cœurs de laitue blanchis, et même presque cuits, hachés auparavant. Mettez le tout dans une casserole avec deux pains de beurre, deux tranches de citron, un peu de poivre concassé. Tournez le tout sur le feu.»

L'ancienneté des précisions culinaires ne garantit hélas pas leur justesse. Expérimentons avec des œufs durs, cuits pendant dix minutes dans l'eau bouillante (pas plus, sinon le blanc devient caoutchouteux, le jaune devient sableux, et un cerne vert accompagné d'une odeur soufrée se dépose à la surface du jaune, preuve que ce gaz nauséabond et toxique qu'est l'hydrogène sulfuré a réagi avec le fer de certaines protéines).

Comme une émulsion de type mayonnaise nécessite une phase aqueuse où les gouttes d'huile pourront se disperser, nous avons mélangé deux cuillerées d'eau avec un jaune d'œuf dur, puis nous avons ajouté de l'huile goutte à goutte en fouettant, comme pour une mayonnaise: cette

Une émulsion d'huile dans l'eau, liée avec un jaune d'œuf dur.



émulsion (une sauce tartare) s'est parfaitement faite, preuve que le jaune d'œuf lie bien les sauces émulsionnées. Le jaune d'œuf dur ayant un goût différent du jaune cru, la sauce tartare est distincte de la sauce mayonnaise.

Ayant ainsi observé que le jaune d'œuf conservait des propriétés tensioactives (qui stabilisent les interfaces eau-huile), nous avons reproduit une sauce hollandaise, émulsion chaude cousine de la mayonnaise: dans une casserole, tout en fouettant de l'eau et du jaune d'œuf dur, nous avons ajouté de l'huile et nous avons obtenu une sauce chaude émulsionnée.

Pourquoi ces propriétés tensioactives? Le jaune d'œuf est composé d'eau, de phospholipides et de protéines; lesquels, des phospholipides et des protéines, assurent l'émulsion? Les phospholipides sont toujours présents et actifs, mais les protéines? Il y avait l'hypothèse que les protéines, ayant coagulé, seraient engagées dans un réseau, de sorte qu'elles n'auraient plus la possibilité de venir tapisser la surface des gouttes d'huile, laissant les phospholipides agir. Mais puisque la cuisson dégrade les protéines (la preuve étant la libération d'hydrogène sulfuré), on pouvait aussi supposer que ce processus produit des résidus tensioactifs. Alors?

Pour tester le rôle des protéines, nous avons cherché à faire une émulsion froide

à partir de blanc d'œuf (de l'eau et des protéines) dur: celui-ci a été écrasé dans deux cuillerées d'eau, puis nous avons ajouté de l'huile en fouettant... et obtenu une émulsion insipide, mais bien constituée. Ainsi, malgré la coagulation, les protéines conservent des propriétés tensioactives.

Ajoutons que la physicochimie moderne s'intéresse aux «émulsions de Ramsden», découvertes en 1903 par le biochimiste d'Oxford Walter Ramsden et popularisées par son compatriote Spencer Pickering en 1907, où la dispersion des gouttes d'huile est due non pas à des molécules, mais à de petites particules: la division du jaune ou du blanc pourrait ainsi apporter des particules s'ajoutant aux molécules déjà présentes. ■



LA RECETTE

- 1 Cuire une échalote émincée dans deux fois son volume d'eau, avec un peu d'acide citrique et d'acide tartrique.
- 2 Faire durcir un œuf dans l'eau bouillante pendant 10 minutes.
- 3 Au mortier et au pilon, broyer l'œuf dur et l'ajouter à l'échalote.
- 4 Ajouter deux cuillerées d'eau, du sel, un peu de glucose.
- 5 Ajouter du beurre et cuire en fouettant jusqu'à l'obtention d'une sauce émulsionnée chaude qui sera servie avec un bon steak.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



N° 494 (déc. 18)
réf. PL494



N° 493 (nov. 18)
réf. PL493



N° 492 (oct. 18)
réf. PL492



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485

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



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

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

1 ^{re} réf.	_____	0,1	x 9,90 € =	_____	€
2 ^e réf.	_____		x 9,90 € =	_____	€
3 ^e réf.	_____		x 9,90 € =	_____	€
4 ^e réf.	_____		x 9,90 € =	_____	€
5 ^e réf.	_____		x 9,90 € =	_____	€
6 ^e réf.	_____		x 9,90 € =	_____	€

TOTAL À RÉGLER _____ €

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

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____
Telephone _____
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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



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



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.58

OUZO

Déposez une goutte d'ouzo sur une surface en verre et observez. Des nanogouttes et microgouttes d'huile d'anis apparaîtront bientôt sur le pourtour, le rendant laiteux, puis se répandront dans toute la goutte en mouvements rapides, avant de se rassembler en un anneau sur lequel reposera l'eau restante. L'alcool, lui, se sera alors déjà évaporé depuis longtemps.

P.50

135 000

C'est le nombre d'ossements mis au jour dans la grotte de Denisova, un important site préhistorique en Sibérie. Mais 95% d'entre eux sont trop fragmentaires pour être identifiés visuellement.

P.7

« Avec près de 55% de participantes cette année, le concours lycéen des Olympiades de physique France combat les stéréotypes qui écartent les femmes de certaines disciplines scientifiques »

PIERRE CHAVEL, président du comité
d'organisation des Olympiades de physique France

P.88

200

Les coquilles saint-jacques comptent jusqu'à 200 yeux. Chacun fonctionne comme un minuscule télescope : un miroir concave multicouche focalise la lumière sur la rétine, située entre le cristallin et le miroir.

P.6

SAUMURES

On produit environ 95 millions de mètres cubes par jour d'eau dessalée dans le monde ; mais ce faisant, on rejette 142 millions de mètres cubes par jour de saumures, principalement dans la mer. Plus denses que l'eau de mer, elles appauvrissent en oxygène les eaux profondes et accroissent leur salinité, ce qui nuit à la vie des fonds marins.

P.26

KRAKATOA

Lors de l'éruption de ce volcan en 1883, des débris ont été projetés dans la stratosphère à 30 kilomètres d'altitude. Ils ont ensuite fait le tour de la Terre en seulement deux semaines.

P.84

100 KM

À bord du *Beagle*, à une centaine de kilomètres de la côte argentine, Charles Darwin a assisté à une invasion d'araignées volantes, portées par des soies longues de 2 à 3 mètres. Elles ont parcouru cette distance grâce au vent et à des forces électrostatiques.



Ensemble

- AIDONS LES ENFANTS MALADES.
- SOUTENONS LA RECHERCHE MÉDICALE.

CONTRE LE CANCER DES ENFANTS

JE M'ENGAGE,

JE FAIS UN DON* !

Je donne en ligne sur luluetlpbl.com,
rubrique "Soutenez-nous"

ou par chèque à l'ordre de Lulu et LPBL
à nous adresser par courrier.

DÉCOUVREZ
NOS ACTIONS
SUR NOTRE SITE

LULUETLPBL.COM

*DONS DÉDUCTIBLES DES IMPÔTS

Je verse 30€, mon don ne me coûtera
que 10€ après réduction fiscale.

SUIVEZ-NOUS SUR  

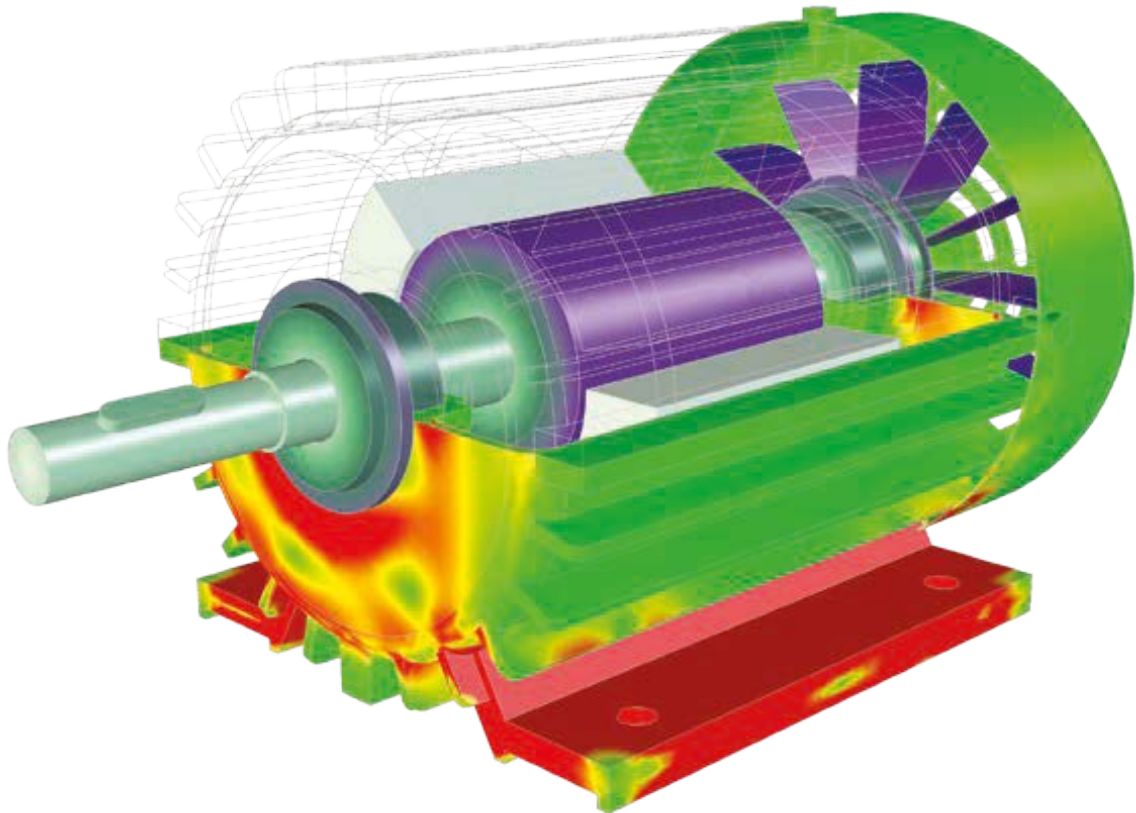
Ensemble contre
le cancer, Pour la vie !

LULU & LES P'TITES BOUILLES DE LUNE

Association loi 1901
8, allée Edith Cavell
77310 SAINT-FARGEAU-PONTHIERRY
Courriel : contact@luluetlpbl.com

luluetlpbl.com

Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor