

Votre vocation fait votre fierté,
la nôtre est de vous assurer.



Exercer son talent au service des autres est une mission que nous partageons. C'est pourquoi, **la GMF, 1^{er} assureur des agents des services publics** en fait toujours plus pour vous assurer dans votre vie personnelle (assurance auto, habitation, complémentaire santé, épargne) et vous accompagner dans votre vie professionnelle. À votre tour, rejoignez nos 3 millions de sociétaires pour profiter **des offres privilégiées** que nous vous réservons.

POUR LES MOINS DE 30 ANS

50€ OFFERTS*

SUR VOTRE ASSURANCE AUTO

Renseignez-vous au **0 970 809 809** (numéro non surtaxé) ou sur **www.gmf.fr**

*Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la 1^{re} année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto, valable jusqu'au 31/12/2014.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde et GMF Vie. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 323 562 678 - Siège social : 11, place des Cinq Martyrs du Lycée Buffon - 75014 Paris. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

80 ans **GMF**
ASSURÉMENT humain

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaa

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Cerveau & Psycho

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle

Rédacteur : Sébastien Bohler

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman,

Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillat

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Yaphne Bavelier, Barbara Demeneix, Laurent Drissen,

Didier Grandjean, Matthias Grote, Eitan Haddock, Anthony

Hillairet, Jean Nabucet, Pascal Philippot, Christophe Pichon,

Sébastien Puechmaille, Philippe Usseglio-Polatera, Loïc Villain

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 25

SERVICE ABONNEMENTS

Sinette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

Pour la Science - 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles

Autres pays : Éditions Belin - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Éditeurs : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti,

Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix,

Kate Wong. President : Steven Inchcombe. Executive Vice

President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou

les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans

la revue « Scientific American », dans les livres édités par

« Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la

Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de tra

duction, d'adaptation et de représentation

réservés pour tous les pays. La marque et le

nom commercial « Scientific American » sont

la propriété de Scientific American, Inc. Li

cence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est inter

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co

pie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris)



Maurice Mashaa
rédacteur en chef

Arbres mythologiques

Dans nos contrées, la période estivale est propice à la contemplation du ciel nocturne. Loin des villes et de leur pollution lumineuse, les vacanciers pourront s'émouvoir du spectacle de la voûte céleste, immensité criblée d'étoiles dans laquelle nos ancêtres ont recherché de l'ordre et du sens – et en ont parfois trouvé.

Les mêmes vacanciers s'amuseront probablement à identifier certaines constellations. Ils repéreront aisément la plus connue d'entre elles, la Grande Casserole, surnom de la Grande Ourse. Ce surnom évocateur n'existait évidemment pas aux époques reculées, où les animaux tels que bisons, ours ou élans peuplaient le quotidien et l'imaginaire des humains. De fait, la Grande Ourse est le vestige dans notre culture de mythes fort anciens, ceux dits de la Chasse cosmique où un animal, poursuivi par un chasseur, monte au ciel et se métamorphose en constellation.

De la classification du vivant à l'histoire des mythes.

Les mythes de la Chasse cosmique constituent une famille, avec des liens de parenté. Afin de reconstituer leur généalogie et celle d'autres familles de mythes, des anthropologues se sont inspirés des algorithmes qu'utilisent les biologistes pour établir des arbres de parenté entre espèces. L'analyse des traits caractéristiques des différents mythes d'une même famille permet ainsi d'établir un arbre généalogique, qui retrace de façon vraisemblable leurs transformations au fil des peuples et du temps, en remontant parfois jusqu'à la Préhistoire (voir *La généalogie des mythes*, page 22).

De la classification du vivant à l'histoire et l'anthropologie des mythes : un bel exemple où des concepts et des méthodes se transposent avec succès d'une discipline à une autre, et qui illustre, une fois de plus, une certaine unité de la science.

1 **édité**

Actualités

1 Les plus anciens organismes pluricellulaires

5 Perturbateurs endocriniens et qualité du sperme



8 Une carte des rivières polluées d'Europe

9 Le char de l'autoroute A304

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 **Éclairage**
Le crédit d'impôt recherche, un bouc émissaire ?

Maurice Mashaal

14 **Entretien**
Comment nous sommes entrés dans l'Anthropocène

Jean-Baptiste Fressoz

18 **Homo sapiens informaticus**
Le zappeur et le chercheur

Gilles Dowek

20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Dessine-moi une ville écologique !

Gérald Bronner

21 **Lu sur SciLogs.fr**
Les deux temps de la science et des médias

Richard Taillet

Le numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* rattachés sur la totalité du tirage.
La couverture : © Andrew Bzh / shutterstock.com

À LA UNE

22

ANTHROPOLOGIE

La généalogie des mythes

Julien d'Huy

En analysant les traits caractéristiques des mythes par les mêmes méthodes qu'utilisent les biologistes pour découvrir les liens de parenté entre espèces, on retrace l'évolution de certaines familles de mythes depuis la Préhistoire.



30

PHYSIQUE

Les acrobaties

des filaments liquides

Neil Ribe, Mehdi Habibi et Daniel Bonn

Ils s'enroulent, oscillent, se plient, serpentent... Soumis à la gravité, les filets de miel, d'huile ou d'autres fluides visqueux ont des comportements étonnants et qui restent imparfaitement compris.



36

MÉDECINE

Mieux traiter le glaucome

Christophe Baudouin, Alexandre Denoyer et William Rostène

Les traitements actuels de cette maladie de l'œil ont leurs limites. Mais de nouvelles pistes se dessinent pour les améliorer et pour en proposer d'autres, qui agiraient à un stade plus précoce.

44 ÉTHOLOGIE

Une course aux armements
acoustiques

William Conner

Les chauves-souris et d'autres prédateurs se servent des sons pour détecter leurs proies. Mais celles-ci ont développé des stratégies de camouflage acoustique.



52 SCIENCES DE L'ÉDUCATION

Apprendre grâce aux jeux vidéo

Alan Gershenfeld

Les jeux vidéo pourraient transformer l'enseignement et l'éducation. Divers jeux éducatifs commencent déjà à apparaître...

58 ASTROPHYSIQUE

Dans l'attente de la prochaine
supernova galactique

Ray Jayawardhana

Quand une étoile explose en supernova, beaucoup de neutrinos, particules difficiles à détecter, sont émis. Les astrophysiciens espèrent capter ceux d'une supernova proche pour mieux comprendre la mort des étoiles.

64 PALÉONTOLOGIE

Traquer des fossiles au GPS

Robert Anemone et Charles Emerson

Jusqu'à présent, la chance était le principal auxiliaire des prospecteurs de fossiles. Avec la mise au point d'une méthode de recherche des gisements de fossiles par satellite, la géolocalisation pourrait prendre le relais.

Rendez-vous

70 Histoire des sciences

Illustration botanique
en Chine et en Inde

Martyn Rix

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, les artistes asiatiques ont insufflé leur talent et leur style aux dessins qu'ils ont réalisés pour le compte de collectionneurs européens.

76 Logique & calcul

Indécidables utiles et inutiles

Jean-Paul Delahaye

Les affirmations sur la complexité sont souvent indécidables. Prises à titre d'axiomes, elles peuvent limiter l'incomplétude mathématique.

82 Science & fiction

Des vampires pas
si imaginaires

Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 Art & science

Des ferrofluides pour
des œuvres de pointe

Loïc Mangin

86 Idées de physique

Du soleil pour chauffer...
et refroidir

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

90 Question aux experts

Combien y a-t-il de planètes
dans la Voie lactée ?

Arnaud Cassan

91 Science & gastronomie

La cuisson des pâtés lorrains

Hervé This

92 À lire

96 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA
SCIENCE

Maintenant sur tablette et sur smartphone !

Téléchargez gratuitement

l'application « Pour la Science »

Un extrait du numéro
en cours de parution

vous est offert !

Le numéro du
Dossier Pour la Science
de l'été est enrichiDISPONIBLE SUR
Google playDISPONIBLE SUR
App Store

SCIENCE



Le bassin sédimentaire de Franceville, au Gabon, a livré de nombreux fossiles. Mesurant plusieurs centimètres de longueur, ces fossiles ont des structures complexes et variées : des lobes (a, b), une forme allongée (c) ou une combinaison des deux (d, e). Datés de 2,1 milliards d'années, ils représentent les premiers organismes pluricellulaires connus.



Paléontologie

Les plus anciens organismes pluricellulaires

Près de 400 fossiles d'organismes pluricellulaires ont été découverts dans le bassin sédimentaire de Franceville, au Gabon. Ce riche écosystème marin, qui date de 2,1 milliards d'années, est désormais mieux connu.

Déjà, quand datent les premiers organismes pluricellulaires ? D'après un site australien, les spécialistes pensaient qu'ils

étaient apparus il y a environ 600 millions d'années. Avant cette période, seuls des organismes unicellulaires (bactéries et algues) étaient attestés. Mais en 2008, l'équipe d'Abderrazak El Albani, de l'Institut de chimie des milieux et matériaux de l'Université de Poitiers et du CNRS, a mis au jour près de Franceville, au Gabon, des fossiles d'organismes pluricellulaires beaucoup plus anciens : 2,1 milliards d'années. Après plusieurs campagnes de fouilles, les chercheurs ont désormais retrouvé près de 400 fossiles qui révèlent de nombreuses informations sur cet écosystème ancien.

Le gisement de Franceville est exceptionnel à plus d'un titre. Les fossiles y sont nombreux et bien préservés. En effet, le bassin sédimentaire de Franceville a été

très peu perturbé par l'activité tectonique de la planète. C'est le bassin sédimentaire de cet âge le mieux conservé au monde.

Les fossiles se trouvent dans des couches sédimentaires d'argiles noires riches en matière organique. Les géologues en ont déduit les caractéristiques environnementales de la région à cette époque : un milieu marin peu profond et riche en oxygène, des conditions qui étaient favorables au développement de formes de vie complexes et organisées.

Lors des premières campagnes de fouille, 250 fossiles avaient été découverts par l'équipe d'A. El Albani. L'analyse de certains rapports isotopiques (carbone, soufre) a confirmé qu'il s'agit bien de structures organiques. Et la datation, effectuée par plusieurs méthodes radioisotopiques, situe l'émergence de cet écosystème à environ 2,1 milliards d'années.

Après plusieurs années de recherche sur le terrain, ce sont aujourd'hui près de 400 spécimens qui ont été étudiés. Les chercheurs se sont aussi intéressés aux processus de fossilisation. Ils ont montré que la pyritisation – la transformation de la matière organique en pyrite (disulfure de fer) du fait d'une activité bactérienne – a été rapide. C'est ce qui a permis de préserver de nombreux détails de la structure de ces macrofossiles, de tailles comprises entre 1 et 17 centimètres.

L'équipe de A. El Albani a utilisé la microtomographie à rayons X pour étudier la morphologie ainsi que les structures interne et externe des fossiles. Ces derniers présentent diverses formes (voir les photographies) : des lobes sphériques ou allongés, des disques et des agrégats de petites billes. La structure de la pyrite évoque des textures gélatineuses et molles, uniformes ou grumeleuses. La taille et la structure des fossiles indiquent que ces organismes étaient plu-

ricellulaires. Des microfossiles carbonés de 50 à 80 micromètres complètent cet inventaire.

L'émergence d'organismes pluricellulaires sur Terre serait ainsi antérieure d'environ 1,5 milliard d'années à ce qu'indiquait le site australien. Les organismes gabonais seraient apparus grâce à la première brusque augmentation du contenu en oxygène de l'atmosphère et des eaux peu profondes, il y a entre 2,3 et 2 milliards d'années.

Ce phénomène est similaire à celui de l'« explosion édiacarienne », il y a 600 millions d'années, qui a vu apparaître la faune complexe de l'Édiacarien dans ce qui allait devenir l'Australie. Cependant, le premier pic d'oxygène n'aurait duré que 200 à 300 millions d'années. La concentration d'oxygène dans l'atmosphère a ensuite diminué, ce qui aurait conduit à l'extinction des organismes du bassin gabonais.

Sean Baillly

A. El Albani et al., PLoS ONE, vol. 9(6), e99438, 2014

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

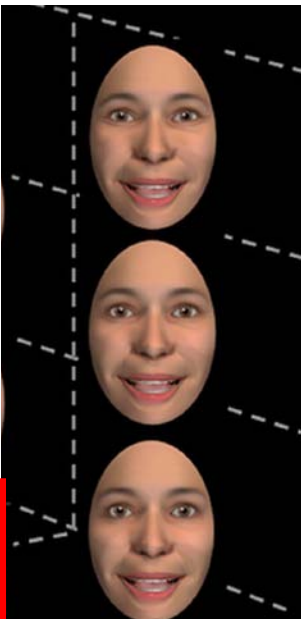


Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux



Neurosciences

Comment reconnaît-on un sourire sincère ?



Les avatars utilisés pour l'étude

Pour passer une bonne soirée, mieux vaut savoir reconnaître si le sourire de votre interlocuteur exprime un ennui poli ou une réelle joie de discuter avec vous. Comment le décodons-nous ? Sebastian Korb, de l'Université du Wisconsin-Madison, et ses collègues ont montré que nous évaluons la sincérité d'un sourire en le jouant en miniature, grâce à des microcontractions invisibles des muscles impliqués.

Dans cette étude, un sourire authentique est défini comme exprimant une réelle émotion positive (joie, amusement, etc.). Selon la théorie de la cognition incarnée, nous comprenons les émotions d'un interlocuteur en activant les mêmes schémas musculaires que lui. Pour la vérifier

dans le cadre de l'évaluation des sourires, les chercheurs ont créé de petites vidéos d'animation où les avatars présentaient 19 types différents de sourire, qui simulaient la contraction plus ou moins intense de divers muscles faciaux. Ces sourires ont été montrés à 61 participants, pendant qu'on enregistrait chez eux l'activité électrique dans ces mêmes muscles. Chaque fois, le participant devait évaluer l'authenticité du sourire sur une échelle de 1 (pas du tout authentique) à 100 (très authentique). Les mesures ont révélé que les participants effectuaient bien des microcontractions mimétiques, et que plus elles étaient intenses, plus le sourire était jugé authentique.

Guillaume Jacquemon

Los ONE, en ligne le 11 juin 2014

Les regrets chez les rats

Le regret est associé à la prise de conscience, après un choix, qu'une autre action aurait été plus profitable. Adam Steiner et David Redish, de l'Université du Minnesota aux États-Unis, ont montré que les rats présentent un comportement et une activité cérébrale qui en sont caractéristiques. Dans des expériences où ils déclinaient une promesse de nourriture rapide puis tombent sur une moins bonne occasion. Ce serait la première fois qu'on met en évidence le regret chez un autre animal que l'homme.

Mort d'une étoile Wolf-Rayet

Les étoiles dites de type Wolf-Rayet ont des masses supérieures à 20 masses solaires. Ces astres massifs sont rares et difficiles à étudier, car ils émettent un fort vent stellaire qui les dissimule dans un nuage dense de matière. Les astronomes supposaient que ces étoiles terminaient leur vie en supernovæ, mais ils n'avaient pas d'observations directes. Cette hypothèse est maintenant confirmée par l'équipe américano-israélienne dirigée par Avishay Gal-Yam, de l'Institut Weizmann, grâce à l'observation d'un stade précoce d'une supernova.

Tétre et séisme

Depuis quelques années, l'activité sismique augmente notablement dans l'Oklahoma, aux États-Unis. Katie Keranen, de l'Université Cornell, et ses collègues ont lié ce phénomène à l'extraction d'hydrocarbures non conventionnels. Le traitement de ces derniers produit une grande quantité d'eau résiduelle, qui est massivement injectée dans le sous-sol. Cela augmenterait la pression de l'eau interstitielle et déclencherait des séismes dans un rayon de 35 kilomètres autour des principaux puits.

Immunologie

Une mémoire immunitaire chez le fœtus

L'environnement fœtal est considéré comme stérile, mais aussi pensait-on que les nouveau-nés avaient un système immunitaire immature, qui n'acquerrait une mémoire des infections qu'après la naissance. L'équipe de Richard Lo-Man, du laboratoire Régulation immunitaire et vaccinologie, à l'Institut Pasteur à Paris (U1041, Inserm), vient de prouver le contraire.

Chez l'enfant et l'adulte, parmi les cellules chargées d'éliminer les microbes – les lymphocytes T –, certaines gardent une mémoire des germes rencontrés et réagissent ainsi plus vite à une nouvelle agression. On pensait que ces lymphocytes T « mémoire » n'existaient pas encore chez le nouveau-né en bonne santé. Dans des conditions stériles, les biologistes ont prélevé et analysé les lymphocytes T du cordon ombilical de 18 nouveau-nés en bonne santé, à la naissance. Ils ont ainsi détecté une petite population de cellules



qui présentaient des caractéristiques de lymphocytes T mémoire.

Ces cellules ne provenaient pas de la mère, car elles portaient bien le patrimoine génétique de l'enfant. Et elles se comportaient *in vitro* comme des lymphocytes T mémoire, produisant une réponse inflammatoire. Comment se sont-elles activées *in utero* ? Kjersti Aagaard, du Collège de médecine Baylor, à Houston, et ses collègues apportent peut-être un début de réponse. Ces biologistes ont montré que le placenta, que l'on pen-

sait stérile, abrite une population de bactéries non pathogènes – un microbiote tel que ceux peuplant l'intestin, la bouche, le nez, le vagin ou la peau. La constitution d'une mémoire immunitaire de ces bactéries (dans l'hypothèse où le fœtus se trouverait exposé au microbiote placentaire) pourrait être une première étape de la formation du système immunitaire anti-infectieux.

Marie-Neige Loraonnier

Science Translational Medicine, vol. 6, 238ra72 et 237ra65, 2014

Santé

Perturbateurs endocriniens et qualité du sperme

La qualité du sperme baisse. Une équipe germano-danoise propose un test pour évaluer de façon systématique l'effet des polluants environnementaux sur l'activation des spermatozoïdes.



spermatozoïdes humains observés au microscope à transmission

On soupçonne 800 substances chimiques synthétiques environ d'être des perturbateurs endocriniens. C'est à dire des molécules qui perturbent le fonctionnement des hormones. Toutefois, l'effet de la plupart d'entre elles n'a pas encore été mesuré sur l'homme, faute de tests adéquats. Avec leurs collègues, Christian Schiffer et Astrid Müller, du Centre d'études et de recherche européennes avancées de Bonn, en Allemagne, ont mis au point un test qui leur a permis d'analyser l'effet direct de 96 perturbateurs endocriniens sur la qualité du sperme.

Pourquoi le sperme ? Si l'évolution de la fertilité masculine reste difficile à évaluer, diverses études suggèrent une baisse de qualité qui pourrait être due à des facteurs environnementaux. Ainsi, selon une vaste étude récente de l'Institut de veille sanitaire, la concentration de spermatozoïdes des Français a continuellement baissé entre 1989 et 2005. La proportion de spermatozoïdes présentant une morphologie normale a aussi diminué. Ces deux tendances étant plus marquées en Aquitaine et Midi-Pyrénées, des régions à forte activité agricole, l'étude suggère

un effet non négligeable des facteurs environnementaux.

Parmi eux, certains perturbateurs endocriniens, tels que le pesticide DBCP ou le phtalate DEHP, ont déjà été identifiés comme pouvant altérer les caractéristiques du sperme. Mais pour de nombreux autres, l'étude reste à faire.

Les biologistes de Bonn ont mis au point une méthode pour tester de façon systématique leur effet sur le fonctionnement des spermatozoïdes. Leur test concerne l'entrée du calcium dans le spermatozoïde, qui déclenche une voie de signalisation essentielle pour son activation. Les biologistes ont d'abord mesuré l'évolution de la concentration de calcium dans les spermatozoïdes en l'absence et en présence de perturbateur endocrinien (une augmentation signale une activation des spermatozoïdes).

Sur les 96 substances testées, 33 déclenchaient une augmentation de la concentration en calcium. Et cette augmentation était bien due à une entrée de calcium par le canal dédié à cette fonction dans les spermatozoïdes des mammifères, CatSper.

L'activation des spermatozoïdes se manifeste notamment

par une motilité plus importante et la libération d'enzymes qui facilitent l'entrée dans l'ovule. Les biologistes ont donc étudié par vidéo-microscopie la motilité des spermatozoïdes en présence des perturbateurs endocriniens, et ont constaté qu'elle était perturbée.

La libération des enzymes était aussi stimulée. Cette activation n'est pourtant pas synonyme d'une meilleure efficacité des spermatozoïdes. Le canal CatSper est activé par des hormones produites par les cellules qui entourent l'ovule. Les perturbateurs entrent en compétition avec ces hormones, et pourraient perturber la fécondation en déclenchant l'activation trop tôt, ou en empêchant les hormones d'agir au bon moment.

Lancé en décembre 2013 par l'Institut de veille sanitaire, le réseau européen Hurgent vise à améliorer la surveillance de la qualité du sperme. Le test de Bonn constituerait un indicateur intéressant, aux côtés d'autres tests qui évalueraient les actions potentielles des substances en amont et sur les phases précoces du développement du système reproducteur.

M.-N. C.

Ch. Schiffer et al., EMBO reports, vol. 15(7), pp. 758-765, 2014

39

pour cent

en moyenne des spermatozoïdes d'un Français avaient une morphologie normale en 2005, contre 61% en 1989.

Géosciences

Comment sont nés les premiers continents

ors du refroidissement de la planète après sa formation, une croûte s'est rapidement formée. La nature de cette croûte

primitive est mal connue, car il en reste peu de traces. Jesse Reimink et ses collègues, de l'Université d'Alberta au Canada, se sont intéressés à la formation des premiers continents à partir de cette croûte primitive. Ils ont analysé la composition de roches continentales parmi les plus anciennes connues, datées de 4,02 milliards d'années. Ces géochimistes sont parvenus à la conclusion que ces continents sont nés par des mécanismes similaires à ceux qui ont formé l'Islande.

La croûte terrestre comprend aujourd'hui la croûte océanique et la croûte continentale, qui se distinguent par leur composition (roche basaltique pour la première et granitique pour la seconde). Les continents actuels se sont constitués grâce au processus de subduction lié à la tectonique des plaques. Lorsqu'une plaque plonge dans le



Les remontées de magma qui ont formé les premiers continents pourraient être du même type que celles qui ont fait naître l'Islande.

manteau, ses éléments les moins denses remontent et engendrent un volcanisme à l'origine des continents. Mais la tectonique des plaques n'était probablement pas active il y a quatre milliards d'années.

Les géochimistes ont isolé des échantillons de gneiss (une roche granitique) provenant du complexe rocheux nommé Acasta Gneiss, au Nord-Ouest du Canada, et qui dateraient de l'époque des premiers continents. La pauvreté des échantillons en aluminium, leur richesse en fer

et leurs concentrations en terres rares suggèrent que la roche s'est formée à partir d'un magma à faible profondeur, tel celui des points chauds ou des rifts. Le magma se serait incorporé à la croûte préexistante et aurait formé les premiers continents. Ce scénario rappelle celui de la formation de l'Islande, île qui est née à partir d'un point chaud situé sous la dorsale médio-océanique de l'Atlantique Nord.

S. B.

J. Reimink et al., *Nature Geoscience*, en ligne le 25 mai 2014

Commandes partagées

rien de plus simple en apparence que de manger ou mâcher un chewing-gum. Cette activité nécessite pourtant une coordination complexe des muscles de la mâchoire et de la langue. Edward Stanek, de l'Université Duke, et ses collègues ont reconstitué les chaînes de commande des muscles de ces deux organes grâce à un virus couplé à une molécule fluorescente. Ils ont ainsi montré que ces chaînes de commande partagent certains neurones, ce qui faciliterait la coordination.

Gène hérité de Denisov

Dans les hauts plateaux du Tibet, le manque d'oxygène accentue le risque de maladies cardiovasculaires... sauf pour les autochtones. En cause : un gène dont le variant est très rare. Or ce gène serait hérité de l'homme de Denisova, d'après l'équipe de Rasmus Nielsen à Berkeley. C'est ainsi à l'« homme de l'Altai », qui vivait en Sibérie il y a 40 000 ans, que les Tibétains devraient l'adaptation de leur sang à la vie en altitude.

Physique des particules

Les neutrinos, pas si exotiques

es neutrinos sont les tribuns du modèle standard de la physique des particules. De nombreux aspects de leur nature restent à éclaircir et des hypothèses sont nombreuses : les neutrinos pourraient être identiques à leurs antiparticules, il pourrait en exister un quatrième type, etc. Des hypothèses difficiles à tester, car les neutrinos interagissent très peu avec la matière ordinaire. Or les équipes des expériences EXO-200 et MINOS viennent de présenter leurs résultats les plus récents sur ces particules étranges.

Si le neutrino est identique à son antiparticule, un certain pro-

cessus nucléaire devrait être possible : la double désintégration bêta sans émission de neutrinos. Dans certains noyaux instables, deux neutrons peuvent se désintégrer simultanément en deux protons et en émettant deux électrons et deux antineutrinos. Mais en théorie, si le neutrino et l'antineutrino sont identiques, l'antineutrino émis par l'une des deux désintégrations peut être capté et provoquer la deuxième désintégration. Pour l'observateur, il y a alors une double désintégration bêta sans émission d'antineutrinos. Les physiciens de l'expérience EXO-200 ont cherché pendant deux ans à détecter une telle double désin-

tégration dans le xénon 136, un noyau *a priori* propice. En vain.

Le neutrino ne semble donc pas identique à sa propre antiparticule. Mais existe-t-il une quatrième famille de neutrinos, hypothèse suggérée par certaines expériences ? On parle de neutrinos stériles, car ils interagiraient encore moins que les autres avec la matière. Or les chercheurs de l'expérience MINOS, au Fermilab, ont annoncé n'avoir enregistré aucun signe de neutrino stérile. Des résultats négatifs qui resserrent l'étau autour des caractéristiques des neutrinos.

S. B.

Nature, vol. 510, pp. 229-234, 2014

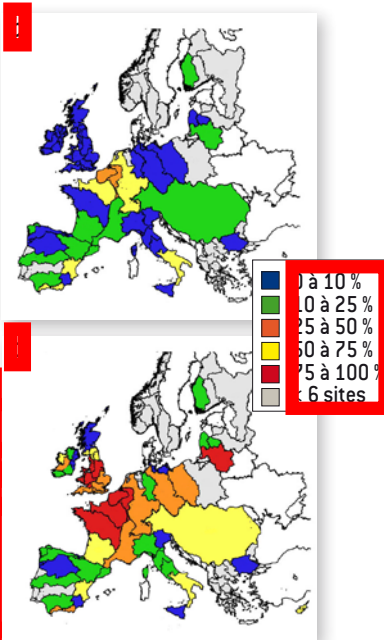


La cuve du détecteur EXO-200, qui traque les doubles désintégrations bêta sans émission de neutrinos.

Environnement

Une carte des rivières polluées d'Europe

Une analyse à l'échelle européenne de 223 composés chimiques présents dans les eaux douces met en évidence les risques toxiques pour l'écosystème – et les limites actuelles de leur suivi.



L'Europe présente un système fluvial dense et varié (a). Les risques aigus (b) et chroniques (c) de toxicité de certains polluants pour les espèces d'eau douce ont été cartographiés à l'échelle du continent européen. Le pourcentage indique la part des stations de prélèvement où au moins un composé chimique dépasse le seuil de risque aigu ou chronique. Les régions ayant moins de six stations n'ont pas été prises en compte.

De nombreuses études ont montré ces dernières années que les cours d'eau européens sont contaminés par des substances toxiques. Mais cette pollution étant souvent limitée à une région ou impliquant un petit nombre de composés, il était difficile de l'extrapoler à l'échelle d'un continent pour mettre en évidence l'aspect global de la contamination. Afin de dresser un tel tableau, une équipe de chercheurs allemands et français a utilisé les données disponibles dans la base de données Waterbase de l'Agence européenne pour l'environnement : ils ont estimé les risques environnementaux liés à 223 composés organiques dans 91 bassins fluviaux d'Europe.

Egina Malaj, du Centre Helmholtz de recherche sur l'environnement à Leipzig en Allemagne, et ses collègues ont analysé les relevés effectués dans près de 4000 sites. À partir de ces données, ils ont estimé le risque de toxicité aiguë ou chronique pour les invertébrés, les poissons et les

algues. Ces seuils de risques ont été calculés à partir des concentrations qui entraînent un risque mortel de 50 pour cent (noté CL50) pour trois représentants des principaux groupes d'organismes vivant en eau douce. Ces seuils de toxicité ont été évalués en laboratoire ou par des modélisations.

D'après les résultats de cette analyse, les polluants organiques entraînent un risque aigu pour la biodiversité dans 14 pour cent des sites, et un risque chronique pour 42 pour cent des sites. Les pesticides sont responsables de la plupart des risques de toxicité aiguë. Par ailleurs, l'étude met en évidence un lien clair entre la perte de biodiversité des cours d'eau d'une région et l'augmentation du risque de toxicité chimique pour les poissons et les invertébrés. L'utilisation anthropique des terres (urbanisme, agriculture) en amont augmente aussi les risques.

L'équipe pointe cependant les limites de cette étude, liées à la nature et la qualité des don-

nées disponibles. Les risques associés aux substances toxiques sont probablement sous-estimés, affirment les chercheurs. En effet, la densité et la performance des réseaux de suivi de la qualité des eaux sont inégales selon les pays. Les méthodes de dosage utilisées présentent parfois des seuils de sensibilité insuffisants. Enfin, encore trop peu de composés chimiques sont étudiés.

D'ailleurs, selon l'analyse, les pays disposant des meilleurs réseaux de surveillance (notamment la France, qui représente un tiers des sites européens analysés) obtiennent les plus mauvais résultats quant à la qualité de l'eau. Il existe donc un biais, qui laisse penser que les pollutions sont sous-estimées à l'échelle européenne et qu'un grand nombre de cours d'eau européens sont notablement touchés par les substances toxiques de nature organique.

S. B.

E. Malaj et al., PNAS, en ligne le 16 juin 2014

Astrophysique

Une étoile hybride ?

Quel cache en son cœur l'étoile HV 2112 ? De l'extérieur, cet astre semble appartenir à la classe des supergéantes rouges, des étoiles parmi les plus volumineuses, au rayon supérieur à 500 fois celui du Soleil, mais dont la masse est seulement

10 fois plus élevée. Emily Levesque, de l'Université du Colorado, et ses collègues pensent que HV 2112, située dans le Petit Nuage de Magellan, serait autre chose : un objet de Thorne-Żytkow, autrement dit une supergéante rouge contenant une étoile à neutrons en son cœur.

Le physicien américain Kip Thorne et l'astronome polonaise Anna Żytkow ont imaginé ces objets en 1977. Leur mécanisme de formation n'est pas parfaitement connu, mais ces étoiles pourraient être créées, par exemple, dans un système binaire dont l'un des membres aurait évolué plus rapidement pour devenir une étoile à neutrons ; cet objet compact aurait ensuite été englouti avant de sombrer vers le cœur de la seconde étoile, elle-même parvenue au stade de supergéante rouge. Ces astres hypothétiques seraient le siège d'une nucléosynthèse exotique. Ils seraient plus riches en certains éléments tels que le lithium, le rubidium et le molybdène. Dr E. Levesque et ses collègues ont détecté une telle composition dans le spectre de l'étoile HV 2112.

E. M. Levesque et al., MNRAS, à paraître, 2014

Archéologie

Le char de l'autoroute A304

La construction de l'A304, qui reliera les Ardennes aux ports de la mer du Nord, a entraîné la découverte près de Warcq d'une atypique tombe gauloise. Émilie Millet, spécialiste du mobilier métallique et membre de l'équipe mixte du Conseil général des Ardennes et de l'INRAP qui fouille le site en urgence, nous renseigne sur les découvertes en cours.

De quel type de tombe s'agit-il ?

Émilie Millet : D'une tombe à char gauloise, c'est-à-dire d'une vaste chambre funéraire, de 15 mètres carrés, dans laquelle un Gaulois de haut rang a été déposé sur un char accompagné d'objets personnels – ses armes, ses parures, ses objets de toilettes, etc. – ainsi que de vaisselle et d'offrandes alimentaires.

La tombe de Warcq contenait un char à deux roues, dont il ne reste que les bandages de fer et des pièces de bois qui constituaient la caisse. Nous y avons aussi trouvé des céramiques sur lesquelles reposait un plateau en bois couvert de feuilles d'or. Une plaque de fer placée près de la jambe droite du mort pourrait correspondre au fourreau de son épée.

Cette tombe à char gauloise serait donc typique ?

É. M. : Pas tout à fait ! Si l'ambiance générale évoque les pratiques gauloises connues, certains objets du mobilier funéraire étonnent. Le défunt portait un collier souple, décoré de feuilles d'or. D'étonnantes petits tabocons, sortes de boutons de verre d'une forme inédite, désignent des alignements autour du squelette. Décor de son habit ou du char ? Nous l'ignorons. Dans un des angles de la tombe, nous avons découvert un long manchon en bronze enserrant du bois, qui pourrait constituer le joug des chevaux ; il est surmonté de six anneaux passe-guides, qui suggèrent un char tiré par trois chevaux ; or, chose aussi inédite, quatre chevaux ont été déposés dans la tombe... De même, le décor géométrique d'une céramique ne se retrouve pas dans les céramiques locales de même époque. Une pièce importée ?

Tous ces détails inhabituels nous troublent d'autant plus que la petite fibule, c'est-à-dire l'agrafe vestimentaire retrouvée au niveau de la ceinture du défunt, invite à dater la tombe du I^{er} siècle avant notre ère, époque pour laquelle peu d'ensembles funéraires sont connus.

Quelles sont les prochaines recherches prévues ?

É. M. : Après leur prélèvement, les objets métalliques feront l'objet d'un nettoyage minutieux en laboratoire par le restaurateur Renaud Bernadet. Pour l'heure, ils sont en mauvais état de conservation et se chevauchent



Émilie Millet est archéologue à l'INRAP (Lab. ArTeHis, UMR 6298).

parfois dans la tombe. Afin de ne pas perdre d'informations, les blocs d'objets prélevés et les objets métalliques seront radiographiés. Nous pourrions alors lancer des analyses afin de comprendre leur fonction et d'affiner leur datation. Pour le moment, cette tombe à char ardennaise présumée du I^{er} siècle avant notre ère soulève encore de nombreuses interrogations, mais tout semble indiquer que nous avons affaire à l'inhumation d'un personnage de haut rang, qui bénéficiait d'échanges à longue distance.

François Savatier

Insolite

Un OVNI martien

La Marine américaine vient-elle de repêcher un OVNI dans les eaux au large de Hawaï ? Presque ! Il s'agit d'un nouveau dispositif d'atterrissage mis au point par la NASA pour les futures missions vers la planète Mars. L'agence américaine vient d'effectuer le premier test de ce système, nommé LDSD (Désaccélérateur supersonique à faible densité). Il a été largué par un ballon stratosphérique à 40 kilomètres d'altitude.



Génétique

Les mutations silencieuses haussent le ton

Le code génétique est dit dégénéré : à chaque codon, un « mot » du génome constitué de trois « lettres » (ou nucléotides) – correspond un seul acide aminé, mais l'inverse n'est pas vrai. Certains acides aminés peuvent être ainsi codés par deux à six codons différents. Dès lors, les mutations qui transforment un codon en un autre codon de même sens sont sans incidence sur la composition de la protéine synthétisée. On les nomme, fort logiquement, mutations silencieuses.

Ce silence se révèle tout relatif. Fabienne Chevance, à l'Université de l'Utah, et deux collègues ont montré que les mutations silencieuses peuvent avoir un effet considérable sur le niveau d'expression des gènes. Chez la salmonelle, une bactérie commune responsable d'intoxications alimentaires, ils ont évalué la vitesse de traduction des 64 codons du code génétique et montré qu'elle peut varier considérablement.

Toute la difficulté était de mesurer la vitesse des ribosomes (organites qui traduisent l'ARN en protéines) sans modifier d'autres paramètres sensibles. Pour ce faire, les chercheurs ont détourné un mécanisme de régulation génétique nommé atténuation. Chez les bactéries, l'atténuation de certains gènes est provoquée par le passage du ribosome dans une région située en amont du produit de transcription de ces gènes. Il est donc possible d'utiliser cette région régulatrice comme un banc d'essai pour mesurer la vitesse du ribosome sur différents codons.

Ce système astucieux, qui aura nécessité cinq ans de travail, a permis aux chercheurs d'évaluer la vitesse de traduction de tous les codons. Et de mettre en évidence un effet parfois considérable : sur certains codons rares, la vitesse du ribosome est réduite d'un facteur cinq par rapport au codon le plus fréquent. « Les mutations silencieuses ne le sont pas », résume Kelly Hughes, responsable de l'équipe de recherche. Pourtant, déplore-t-il, l'idée que ces mutations n'ont qu'une influence négligeable est encore trop répandue chez les chercheurs en génomique.

Ivan Pande

F. V. Chevance et al., PLOS Genetics, en ligne le 5 juin 2014

Archéologie

Le plus vieux des pantalons

Ces pantalons auraient été une invention de cavalier. C'est ce que semble confirmer le pantalon de quelque 2 000 ans qu'une équipe germano-chinoise dirigée par Mayke Wagner, de l'Institut archéologique allemand (Berlin), et par Xiao Li, de l'Université Renmin de Chine (Pékin), vient de découvrir dans une tombe du bassin du Tarim, en Asie centrale.

Le pantalon habitait l'un des défunts de la tombe M21 de la nécropole de Yanghai, située à 33 kilomètres de la ville moderne de Tourfan. La nécropole est attribuée à la culture de Subeshis, probablement protoscythique. Le défunt, âgé d'une quarantaine

d'années, a été couché sur le côté dans une chambre funéraire de bois, en compagnie de 41 objets d'or, de bronze, de bois, de pierre, de coquillage, de laine et de cuir. Parmi eux, la présence d'une bride de cuir ornée de boutons de cuivre et dotée d'un mors de bois prouve qu'il s'agissait d'un cavalier. Une hache de guerre atteste qu'il s'agissait aussi d'un guerrier. La datation de la laine du pantalon montre qu'elle a été récoltée entre 1056 et 940 avant notre ère.

Le pantalon est fait de trois pièces, deux rectangles évasés vers le haut et un renfort pour l'entrejambe, que, selon toute vraisemblance, une même personne a tissées et cousues. Avant de mettre le renfort, la couturière (ou le couturier) a pris soin de placer les manchons à environ 60 degrés l'un de l'autre, ce qui lui a permis, en repliant le renfort de l'entrejambe, de coudre sans être gêné par des plis. Une fois cousu, le renfort se plisse lorsqu'on enfilerait le pantalon pour marcher, et il se déplie pour se placer en protection de l'entrejambe dès que l'on enfourche un cheval. Résultat : un vêtement qui permet de marcher et de monter à cheval...

R. S.

Quaternary International, en ligne le 22 mai 2014



Mercuré, une naissance violente

Le noyau métallique de Mercure représente environ 70 pour cent de la masse de la planète, une proportion inhabituellement élevée. En simulant les débuts du Système solaire sur ordinateur, Erik Asphaug, de l'Université de l'Arizona, et son collègue l'ont expliqué par une ou plusieurs collisions entre embryons planétaires. Ces collisions auraient dépouillé le proto-Mercure de son manteau rocheux et l'auraient éjecté de son orbite initiale, empêchant ainsi de recapturer de la matière.

Volcans sous-marins, source de tsunamis

Les tsunamis de près de 10 mètres de hauteur sont provoqués par des séismes sous-marins de magnitude parfois modérée. Rebecca Bell, de l'Imperial College à Londres, et ses collègues ont étudié les données géophysiques liées à deux tsunamis qui ont touché la côte néo-zélandaise en 1947. Les géologues ont montré que des volcans sous-marins éteints auraient bloqué un processus de subduction de plaques tectoniques. L'énergie accumulée s'est ensuite brutalement libérée et a produit le séisme et le tsunami.

Le diable de mer hante les profondeurs

On observe souvent les raies *Mobula tarapacana*, surnommées diables de mer chiliens, près de la surface des océans où elles profitent de la chaleur du Soleil. Mais en suivant 15 raies, l'équipe de Simon Thorrold, de l'Institut océanographique de Woods Hole, a montré qu'elles plongent régulièrement à près de 2 000 mètres de profondeur, probablement pour se nourrir.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

LES 10 ANS D'OPPORTUNITY

Le rover a détecté
de l'eau sous
plusieurs formes
et en divers endroits



NOUVELLE
FORMULE

DOSSIER POUR LA SCIENCE - ASTRONOMIE - TECHNOLOGIE SPATIALE - EXOBIOLOGIE

Mars

Embarquement immédiat



LA VIE SUR MARS

La planète
a été propice
à l'apparition de la vie

LES MÉTÉORITES

Que nous apprennent
les morceaux de Mars
tombés sur Terre ?

N° 84 Juillet-Septembre 2014

pouirlascience.fr

Belgique : 12,90 € - Canada : 11,50 € - Danemark : 11,50 € - Espagne : 9,90 € - France : 6,95 € - Allemagne : 11,50 € - Grèce : 11,50 € - Hongrie : 11,50 € - Italie : 11,50 € - Japon : 11,50 € - Pays-Bas : 11,50 € - Royaume-Uni : 11,50 € - Suisse : 15,00 €

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale



Disponible sur



ÉCLAIRAGE

Le crédit d'impôt recherche, un bouc émissaire ?

Les difficultés de la recherche publique ravivent les attaques contre cette aide fiscale en faveur de la recherche privée. En ligne de mire : le coût pour l'État de ce crédit d'impôt ainsi que ses bienfaits réels sur l'économie et l'emploi scientifique.

Maurice MASHAAL

D'un nouveau, un malaise agite le monde de la recherche scientifique publique en France, et la grogne promet d'être plus visible encore après la trêve de l'été. Espoirs déçus après le changement de gouvernement, crédits et recrutements en baisse, multiplication des emplois précaires, insistance abusive sur la recherche « au service de la société », effets en partie négatifs des réformes de l'organisation de la recherche et de l'autonomie des universités, etc. : les raisons sont diverses et complexes.

L'une des cibles de l'argumentation des contestataires face aux financements, jugés insuffisants, de la recherche publique est le crédit d'impôt [en faveur de la] recherche, ou CIR, octroyé aux entreprises. Ce dispositif fiscal destiné à stimuler la recherche dans le secteur privé n'est qu'un élément parmi d'autres dans la vaste question du « système français de recherche et d'innovation », mais la particularité de représenter aujourd'hui un coût important pour l'État, et donc de localiser des revendications.

Ainsi, s'inquiétant de la crise de l'emploi scientifique en France, le Conseil scientifique du CNRS soulignait dans un texte publié en mars dernier que le CIR avait, entre 2006 et 2011, « augmenté considérablement (de 980 à 5 100 millions d'euros), sans aucun effet d'entraînement observable sur la recherche privée ». Autre exemple : une motion de la section 25 du Conseil national des universités, adoptée

le 3 février 2014, affirmait : « Moins de 2 % du crédit d'impôt recherche suffirait à boucler le budget des universités. C'est donc par choix politique que l'argent de la recherche est donné au privé ».

Le CIR est-il un dispositif fiscal trop coûteux pour l'État ? Quelle est son efficacité ? Faut-il le réformer ? Faut-il réduire son coût et utiliser les sommes ainsi économisées pour donner de l'oxygène à la recherche publique ? Telles sont quelques-unes des questions suscitées par le CIR. Les réponses, on s'en doute, ne sont pas unanimes...

L'EFFET DU CRÉDIT D'IMPÔT RECHERCHE est « probablement pas à la hauteur de son coût pour l'État », selon un rapport de l'OCDE publié en juin 2014

Expliquons d'abord en quoi consiste le CIR. Ce dispositif créé en 1983 est, pour l'essentiel, une réduction de l'impôt sur les sociétés accordée à une entreprise sur la base de ses dépenses de recherche et développement (R&D). Les modalités précises ont changé plusieurs fois au fil des ans, la dernière réforme importante datant de 2008.

Actuellement, le taux du CIR est de 30 % des dépenses de R&D de l'entreprise si celles-ci sont inférieures à 100 millions d'euros, et de 5 % au-delà. À cette disposition principale s'ajoutent des mesures plus spécifiques : remboursements immédiats pour les jeunes entreprises innovantes, barèmes doublés pour les recherches confiées à des opérateurs publics et pour le recrutement

de jeunes docteurs, etc.] et, depuis 2013, un « crédit d'impôt innovation ».

Le nombre d'entreprises sollicitant un CIR a fortement crû ces dernières années : en 2011, il était d'environ 20 000 (dont près de 15 000 bénéficiaires), le double de ce qu'il était avant la réforme de 2008. Mais c'est surtout le montant total représenté par le CIR qui a explosé : 5,17 milliards d'euros en 2011 (voir le graphique). Et selon un rapport de la Cour des comptes de juillet 2013, il devrait être compris entre 5,5 et 6,2 milliards en 2014, et pourrait vite atteindre les 7 milliards d'euros par an.

Pour comparaison, en 2011, le budget du CNRS était de 3,2 milliards d'euros, et la dépense publique de R&D, où le CIR n'est pas comptabilisé (car c'est une non-recette fiscale), était de 16,3 milliards d'euros. Le CIR a financé près de 20 % de la dépense intérieure de R&D des entreprises (DIRDE), qui était de 23,4 milliards d'euros.

« Cinq ou six milliards d'euros de CIR, c'est énorme ; cette aide fiscale en faveur de la recherche privée est la plus généreuse au monde », commente Rémi Barré, spécialiste des politiques d'innovation à l'IFRIS (Institut francilien recherche innovation société, un groupement d'intérêt scientifique). Il est donc légitime de s'interroger sur l'impact de cette aide fiscale sur la R&D en France. La question est complexe, car de nombreux autres paramètres économiques interviennent (niveau général de l'imposition des entreprises, aides directes accordées à tel ou tel secteur de la recherche privée,

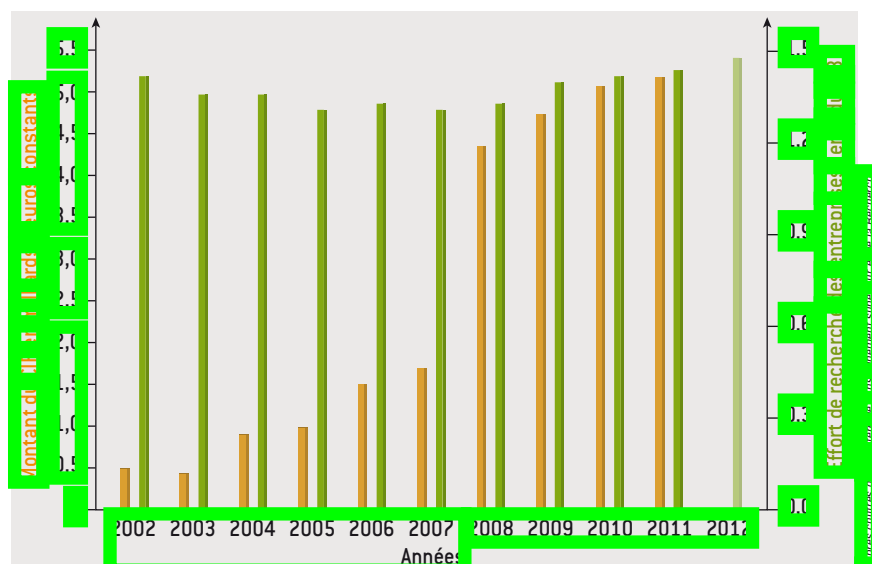
etc.). De plus, les modalités du CIR ayant changé au cours des ans, il est difficile d'en étudier les effets à long terme. Et la plupart des bilans détaillés ne couvrent que les années allant jusqu'en 2011, d'où un manque de recul.

De façon générale, le dernier rapport (juin 2014) de l'OCDE sur la politique d'innovation de la France n'est pas très flatteur sur la R&D française et la politique qui la régit. Et concernant le CIR, il affirme que son effet « n'est probablement pas à la hauteur de son coût pour l'État », bien qu'il reconnaisse un effet positif sur la R&D des entreprises. On peut tenter d'estimer cet effet à travers la part de la DIRDE dans le PIB, le produit intérieur brut. Selon les données du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, la part de la DIRDE a effectivement légèrement augmenté ces dernières années, passant de 1,31 % du PIB en 2007 à 1,48 % (chiffre provisoire) en 2012 [voir le graphique].

Ce n'est pas pour autant une augmentation spectaculaire, et d'aucuns jugent le résultat trop modeste par rapport au coût du CIR. Dans son rapport de juillet 2013, la Cour des comptes juge ainsi que cette évolution n'est pas « en proportion de l'avantage accordé aux entreprises ».

Toutefois, souligne R. Barré, une telle évolution, dans le contexte économique morose qui règne depuis 2008, est plutôt un bon signe : « On aurait pu craindre, compte tenu de la conjoncture générale, une diminution ou stagnation des dépenses de recherche des entreprises, comme dans la plupart des autres pays occidentaux. Or cela ne s'est pas produit, peut-être grâce au CIR. » De même, selon lui, le CIR a probablement freiné la délocalisation partielle des services de recherche des grandes entreprises, dans le cadre de leur développement sur les marchés porteurs à l'étranger.

L'un des reproches faits au CIR est que ce sont surtout les très grandes entreprises qui en bénéficient. De fait, en 2011, environ 43 % du CIR sont allés aux entreprises de plus de 2 000 salariés, qui assurent plus de la moitié de la R&D totale du secteur privé, et 31 % aux entreprises de moins de 250 salariés. Les sociétés de taille moyenne semblent



L'ÉVOLUTION DE LA DEPENSE intérieure de recherche et développement des entreprises (DIRDE), en pourcentage du PIB, et celle du crédit d'impôt recherche (CIR), en milliards d'euros constants. Les montants du CIR n'intègrent pas les redressements effectués par l'administration fiscale qui, selon Franck Debaugé, directeur associé de la société de conseil ACIES et animateur de l'Observatoire du CIR, ont été en 2011 d'environ 400 millions d'euros.

défavorisées, mais cette situation ne fait que refléter la structure déséquilibrée du tissu industriel français, qui compte relativement peu d'entreprises de taille intermédiaire.

En tout cas, le CIR est plébiscité par les petites entreprises innovantes, à l'instar de *Supersonic Imagine*, une société créée en 2005 et qui développe des appareils innovateurs d'imagerie par ultrasons en collaboration avec des chercheurs du CNRS. Jacques Souquet, son fondateur et président, en témoigne : « C'est un dispositif très utile pour les petites entreprises, qui n'existe pas aux États-Unis, et il est pour nous un *booster* important. » Sa société dépense en R&D environ 6 millions d'euros par an et bénéficie de 1,4 million d'euros de CIR. « Une remise en question du CIR serait dramatique pour nous », ajoute-t-il.

En ce qui concerne l'emploi scientifique, les statistiques du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche font état d'une augmentation régulière du nombre de chercheurs travaillant dans la R&D privée (d'environ 120 000 en 2007 à plus de 150 000 en 2012). Mais pour les jeunes docteurs, toujours boudés par les entreprises françaises au profit des ingénieurs, le tableau

est moins rose, malgré l'incitation financière du CIR. « L'embauche de jeunes docteurs a augmenté de quelque 700 docteurs par an à environ 1 200-1 400 », indique Pierre Bitard de l'ANRT (Association nationale de la recherche et de la technologie). « Mais ce chiffre reste faible, sachant que plus de 10 000 nouveaux docteurs entrent sur le marché chaque année. Tout n'est pas qu'une question d'argent. »

Ainsi, il existe probablement des effets positifs du CIR sur la R&D des entreprises, mais ils restent à évaluer de façon plus complète et approfondie. Et les nombreux rapports parus sur ce dispositif montrent qu'il est perfectible, que ce soit pour le simplifier, limiter son coût et les effets d'aubaine – voire la fraude –, améliorer son ciblage, faciliter son évaluation, etc. Reste que cela ne résoudra pas les difficultés de la recherche publique, qui n'ont qu'un rapport lointain avec le CIR.

Maurice MASHAAL est rédacteur en chef de Pour la Science.

Liens vers les rapports mentionnés :
<http://tinyurl.com/k4oocka>,
<http://tinyurl.com/mfnzmzs>,
<http://tinyurl.com/pnl2zn8>

ENTRETIEN

Comment nous sommes entrés dans l'Anthropocène

Entretien avec Jean-Baptiste FRESSOZ

En 2002, le Néerlandais Paul Crutzen, prix Nobel de chimie en 1995 pour ses travaux sur le couche d'ozone, proposa dans la revue *Nature* d'ajouter un nouvel âge à l'histoire géologique de la Terre : après l'Holocène, qui a débuté il y a 11 500 ans, « il semble approprié de nommer l'Anthropocène l'époque géologique présente, dominée à la fois par les nombreux titres par l'action humaine ». Du grec *anthropos*, « être humain », et *kainos*,

« récent, nouveau », le terme désigne la nouvelle période des humains, l'âge de l'homme. Pour P. Crutzen, ce nouvel âge commence en 1784, date du brevet de James Watt sur la machine à vapeur, symbole des débuts de la révolution industrielle. Depuis, le concept de l'Anthropocène connaît un grand succès scientifique et public. Mais que recouvre-t-il précisément ? Dans son ouvrage *L'événement Anthropocène* paru récemment

(Seuil, 2013), Jean-Baptiste Fressoz, historien des sciences au CNRS et maître de conférence au King's College de Londres, et Christophe Bonneuil, historien des sciences au CNRS, apportent un éclairage historique sur cette notion. J.-B. Fressoz nous explique ici en quoi la compréhension de l'avènement de l'Anthropocène est indispensable pour appréhender les enjeux de cette nouvelle ère et orienter nos actions.



JEAN-BAPTISTE FRESSOZ

POUR LA SCIENCE

Quels sont les arguments justifiant d'ouvrir une nouvelle ère géologique qui aurait débuté avec la révolution industrielle ?

J.-B. FRESSOZ : Par rapport à 1750, du fait des activités humaines, l'atmosphère s'est enrichie de 150 pour cent de méthane (CH_4), de 63 pour cent de protoxyde d'azote (N_2O) et de 43 pour cent de dioxyde de carbone (CO_2). Concernant ce dernier gaz, sa concentration est passée de 280 parties par million à la veille de la révolution industrielle à 400 en 2013, soit un niveau inégalé depuis trois millions d'années. De nouveaux gaz sont aussi entrés dans la composition de l'atmosphère depuis 1945 : les gaz fluorés tels les chlorofluorocarbures, utilisés jusque dans les années 1990 dans les réfrigérateurs et les bombes à aérosols.

Tous ces gaz sont dits « à effet de serre » : ils retiennent la chaleur que la Terre évacue vers l'espace. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit

ainsi une hausse de température de 1,5°C à 6°C entre 1800 et la fin du XXI^e siècle.

Un deuxième élément est l'effondrement de la biodiversité. Ces dernières décennies, le taux de disparition des espèces est 100 à 1 000 fois supérieur à la normale géologique : les biologistes parlent de la « sixième extinction massive » depuis l'apparition de la vie sur Terre.

PLS

D'autres transformations témoignent-elles d'une influence humaine majeure sur la planète ?

J.-B. F. : Oui, et elles sont nombreuses ! L'altération des cycles bio-géochimiques de l'eau, de l'azote et du phosphate, tous aussi essentiels que celui du carbone et tous passés sous l'emprise humaine au cours des deux derniers siècles, est particulièrement emblématique.

Selon une étude menée en 2005 par Christer Nilsson, de l'Université d'Umeå, en Suède, et ses

collègues, la modification du cycle continental de l'eau est sans équivoque : la moitié des zones humides de la planète sont drainées et 15 000 barrages de plus de 15 mètres de hauteur retiennent 6 500 kilomètres cubes d'eau, soit 15 pour cent du flux hydrologique des rivières du globe.

Le cycle de l'azote a été modifié de façon radicale par l'industrialisation (les combustions associées libèrent des oxydes d'azote, lesquels augmentent l'effet de serre) et par le procédé Haber-Bosch, utilisé depuis 1913 pour transformer l'azote atmosphérique en azote assimilable par les plantes (engrais). Le monoxyde d'azote libéré par les engrais accentue l'effet de serre, et les produits azotés en excès (urée, nitrates) polluent les nappes d'eau, rivières et estuaires, perturbant leurs écosystèmes. La quantité moyenne d'azote introduit chaque année dans le cycle par les activités humaines est supérieure à celle de l'azote produit naturellement par la biosphère, et pourrait être doublée en 2050, selon une étude publiée en 2007 par le physicien britannique de

environnement Mark Sutton et ses collègues. Le cycle global du phosphore porte lui aussi la marque de la domination humaine avec un flux anthropique huit fois plus important que le flux naturel.

PLS

L'échelle de temps de l'Anthropocène est infime comparée à la durée des autres ères de la Terre. Les scientifiques y voient-ils une période géologique comme les autres ?

J.-B.F. : Pour les géologues, plusieurs arguments plaident en faveur de cette hypothèse. D'abord, la concentration de dioxyde de carbone n'a pas eu d'égale depuis le Pliocène, il y a trois millions d'années. La perte de biodiversité est aussi d'un rythme comparable à seulement cinq autres épisodes depuis quatre milliards d'années. De plus, des traces des changements anthropiques de la composition de l'atmosphère sont détectées dans les carottes de glace de l'Antarctique. Enfin, les nouvelles substances libérées dans les écosystèmes depuis 150 ans constituent une signature typique de l'Anthropocène dans les sédiments et les fossiles en cours de formation.

PLS

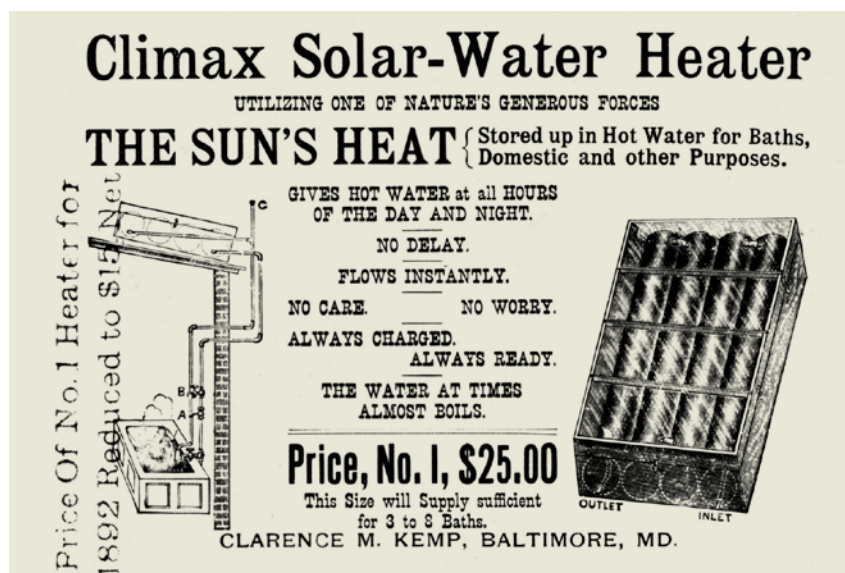
Paul Crutzen a donc raison, nous sommes bien entrés dans une ère nouvelle ?

J.-B.F. : Oui, il n'y a aucun doute. Les activités humaines modifient la Terre de façon irréversible. Par rapport à la temporalité courte de la « crise environnementale », l'Anthropocène désigne un point de non-retour : nous avons perturbé le système Terre pour longtemps. Ce que nous vivons n'est pas simplement une crise environnementale, mais une révolution géologique d'origine humaine.

PLS

S'il n'est plus possible de revenir en arrière, comment agir ?

J.-B.F. : C'est ici que l'histoire joue un rôle déterminant. L'élégance, la concision et le caractère englobant du terme « Anthropocène » se paient cher. Car de quelle humanité parlons-nous ? Un



L. PUBLICITE POUR UN MODELE DE CHAUFFE-EAU SOLAIRE utilisé aux Etats-Unis en 1892. L'énergie solaire a failli s'imposer aux Etats-Unis pour les usages domestiques. Il a fallu tout le poids des compagnies électriques, notamment *General Electrics*, pour imposer sans nécessité technique le chauffage électrique. Le chauffage solaire a peu à peu été abandonné.

Américain moyen ne consomme-t-il pas 32 fois plus de ressources et d'énergie qu'un Kényan moyen ? Les Indiens Yanomani, qui chassent, pêchent et jardinent dans la forêt amazonienne en travaillant trois heures par jour, sans aucune énergie fossile, doivent-ils se sentir responsables de l'Anthropocène ?

Faute d'ancrage historique précis, le concept de l'Anthropocène risque d'entériner une vision simplifiée de l'humanité : « une espèce » unifiée par la biologie et le carbone, collectivement responsable de la crise. Une telle vision effacerait la grande variation des causes et des responsabilités entre les peuples et les classes sociales. Porter un regard historique lucide sur l'Anthropocène nous apprend plusieurs choses importantes pour comprendre les enjeux des dérèglements écologiques d'aujourd'hui. Car les récits du « comment nous en sommes arrivés là » conditionnent en partie les « solutions » envisageables.

PLS

Comment est raconté l'avènement de l'Anthropocène ?

J.-B.F. : Le récit classique des anthropocénologues est en trois étapes. La Terre a basculé dans l'Anthropocène avec la révolution industrielle.

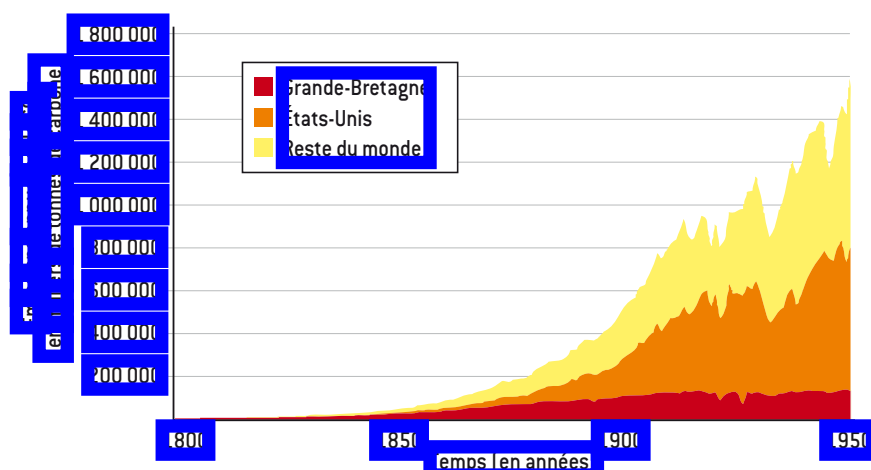
Puis les impacts humains ont augmenté de façon exponentielle après la Seconde Guerre mondiale. Enfin, à partir de l'an 2000, une nouvelle conscience de l'impact humain sur l'environnement global est apparue, ainsi que les premières tentatives de gouvernance globale pour gérer les relations de l'humanité avec le système Terre. Mais lorsqu'on creuse l'histoire de cette période, on s'aperçoit qu'elle n'est pas aussi simple.

PLS

Que nous apprend l'histoire sur ce récit ?

J.-B.F. : Plusieurs choses. L'une d'elles est que l'Anthropocène n'est pas apparu sous l'effet d'une action humaine en général qui aurait conduit à une forte empreinte écologique, mais de plusieurs actions humaines. On ne pourra pas comprendre l'avènement de l'Anthropocène en se contentant d'étudier les milieux atteints et les cycles bio-géochimiques perturbés. Il est indispensable de prendre aussi en compte les acteurs, les institutions et les décisions qui ont produit ces atteintes et ces perturbations.

Par exemple, le récit classique de l'entrée dans l'Anthropocène occulte le caractère impérial des nations qui s'industrialisent, en premier



2. LES ÉMISSIONS ANNUELLES DE DIOXYDE DE CARBONE entre 1800 et 1950. La Grande-Bretagne (XIX^e siècle), puis les États-Unis, sont responsables d'une bonne part de ces émissions

eu la Grande-Bretagne. Ces nations ont eu (et ont encore) le pouvoir économique et la force militaire pour prélever à bon prix des matières premières dans les pays périphériques de leur empire.

Un regard rétrospectif sur les origines de la crise climatique confirme ces rapports très inégalitaires entre nations et le lien étroit entre crise environnementale et entreprise de domination globale : les puissances hégémoniques du XIX^e siècle (la Grande-Bretagne) et du XX^e siècle (les États-Unis) représentent 55 pour cent des émissions cumulées de dioxyde de carbone en 1900, 65 pour cent en 1950 et presque 80 pour cent en 1980, selon le Centre d'analyse américain de l'information sur le dioxyde de carbone (CDIAC).

PLS

La France a aussi fait partie de ces nations colonisatrices. Quel a été son impact ?

J.-B. F. : Par comparaison, les émissions françaises sont moindres. En 1913, par exemple, le produit national brut par habitant des Anglais est supérieur de 20 pour cent à celui des Français, alors que les émissions cumulées anglaises sont quatre fois celles de la France (6 milliards de tonnes de carbone contre 1,5). Durant le XIX^e siècle, les Anglais ont donc émis quatre fois plus de dioxyde de carbone, pour aboutir à une richesse équivalente à celle des Français. En 2008, les émissions cumulées de la France comptent pour quatre pour cent du total, celles

de la Grande-Bretagne pour dix pour cent

PLS

Quels sont les autres enseignements de l'histoire sur l'avènement de l'Anthropocène ?

J.-B. F. : L'histoire montre que l'humanité est entrée sciemment dans l'Anthropocène et que celui-ci n'était pas du tout inéluctable. Elle révèle aussi l'enchaînement des décisions qui ont conduit à cette nouvelle ère, et les intérêts sous-jacents.

Les alertes scientifiques sur les dégradations environnementales globales sont aussi anciennes que le basculement dans l'Anthropocène. Il existait autour de 1800 une théorie répandue d'un changement climatique global causé par la déforestation, alors massive en Europe de l'Ouest. Les savants se référaient aux travaux du Britannique Stephen Hales sur la physiologie des plantes et leurs échanges gazeux avec l'atmosphère (*Vegetable Statics*, 1727) pour imputer les dérèglements climatiques (froids, sécheresses, tempêtes et précipitations) à la destruction de la couverture végétale : les arbres, par les relations qu'ils entretiennent avec l'atmosphère, tempèrent les climats, assèchent les lieux humides et humidifient les lieux secs ; ils préviennent en outre les tempêtes, l'érosion et les inondations. La déforestation était conçue comme une rupture dans l'ordre naturel et providentiel

équilibrant les cycles de matière entre terre et atmosphère.

Des discours établissaient des connexions climatiques globales : par exemple, selon les ingénieurs français François-Antoine Rauch et Jean-Baptiste Rougier de La Bergerie ou le naturaliste britannique Joseph Banks, la déforestation aux États-Unis et en Europe augmente l'humidité dans l'atmosphère, celle-ci se condense aux pôles, accroissant la calotte glaciaire et causant des mauvaises saisons en Europe. Le changement climatique était aussi pensé comme un phénomène irréversible questionnant le sens même de la civilisation. Puisqu'en déboisant, on transforme le climat, on sape les conditions mêmes d'existence de la forêt.

Certes, ces théories sont aujourd'hui corrigées, mais il s'agissait à cette époque de la meilleure science disponible. Certes, les données climatiques d'aujourd'hui sont plus denses, massives et globales, mais il est faux et trompeur de faire passer les sociétés du passé comme inconscientes des dégâts environnementaux, sanitaires et humains de l'industrialisme.

PLS

Les alertes ont-elles été suivies d'effets ?

J.-B. F. : Mille luttes ont été déclenchées, mais pas tant par les alertes scientifiques qu'à cause des difficultés entraînées localement par l'industrialisation. Partout en France, par exemple, les cahiers de doléances de 1789 témoignent des plaintes innombrables contre les activités industrielles (les forges et les salines, notamment), accusées de causer la déforestation et d'accroître le prix du bois. En 1827, certains droits coutumiers de prélèvements villageois dans les forêts sont supprimés, ce qui intensifie encore les conflits. Entre 1780 et 1830, le recul des forêts européennes est dénoncé, et l'industrie accusée d'y prélever trop de bois. Les arguments sont tant environnementaux qu'anticapitalistes.

La mécanisation de la production est aussi source de conflits. Un large mouvement de contestation et de bris de machines touche toute l'Europe de la fin du XVIII^e siècle au milieu du siècle suivant. Artisans urbains et ouvriers ruraux expriment leur refus de se voir dépossédés de leurs savoir-faire et de leur mode de vie. Ils

accusent aussi les industriels de faire passer la quantité de produits devant leur qualité ou leur durabilité, afin de rentabiliser les machines. On s'oppose aussi aux pollutions et aux nuisances. Les intellectuels romantiques participent au mouvement.

PLS

Il y a-t-il pas toujours eu des personnes opposées aux innovations ?

J.-B. F. : Oui, mais ce qui est intéressant ici, c'est la multitude des discours et des solutions proposées : les résistances ne portent jamais sur « la » technique en général, mais sur « une » technique particulière. Il revient alors à l'historien de mettre en lumière les alternatives existantes à chaque moment : au lieu des chemins de fer coûteux, des canaux plus économes ; au lieu du gaz d'éclairage et ses dangers d'explosion, des lampes à huile ; etc. Or ces alternatives n'ont pas été prises en compte par l'historiographie de la « révolution industrielle » qui a dominé les décennies d'après 1945. La mécanisation et la production de masse étaient dépeintes comme inexorables, et les luttes comme rétrogrades.

De fait, l'histoire des débats, résistances et alternatives nous apprend que l'Anthropocène n'était pas inéluctable, mais le fruit d'une succession de choix.

PLS

Pourriez-vous donner un exemple concret ?

J.-B. F. : Prenons le cas de l'énergie. La focalisation des historiens sur la révolution industrielle et les énergies fossiles masque la prédominance des énergies renouvelables jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Par exemple, c'est au début du XX^e siècle que le nombre de chevaux atteint son apogée aux États-Unis. De même, vers 1870, l'hydraulique y fournit 75 pour cent de l'énergie industrielle, et 82 pour cent du tonnage de la marine marchande britannique est encore à voile.

L'histoire des énergies renouvelables, animales, éoliennes et solaires, avant qu'elles ne soient considérées comme « alternatives », fait apparaître un passé riche de trajectoires techniques négligées. À la fin du XIX^e siècle, six millions d'éoliennes activant autant de puits ont

L'impact humain en chiffres :

Entre 1950 et 2000, plusieurs indicateurs de l'impact humain sur le système Terre se sont emballés :

- La population mondiale a plus que doublé
- La consommation d'eau a triplé
- La consommation d'engrais a été multipliée par cinq
- La consommation de papier a été multipliée par cinq
- Les pertes de forêt ont triplé
- Le nombre de barrages de rivière construits a été multiplié par six.
- Le nombre de véhicules motorisés est passé de quelques dizaines de milliers à plus de 600 millions.

participé à l'ouverture des plaines du Midwest américain à l'agriculture et à l'élevage. Dans le monde rural américain, la production d'électricité décentralisée (par des éoliennes et des batteries) a dominé, jusqu'aux grands programmes d'électrification rurale de la Dépression et de l'après-guerre.

De même, l'énergie solaire a bien failli s'imposer aux États-Unis pour les usages domestiques. En Californie et en Floride, près de 80 pour cent des habitations étaient équipées de chauffe-eaux solaires en 1950, jusqu'à ce que les compagnies électriques exercent une forte pression en faveur du chauffage électrique. Les industries pétrolière et automobile ont aussi travaillé à la banqueroute des compagnies de tramways dans les années 1930 (allant même jusqu'à racheter des lignes pour les fermer) afin de vendre leurs produits plus rentables.

PLS

En quoi ce regard historique peut-il nous aider à stabiliser le système Terre ?

J.-B. F. : En révélant la stratification des intérêts et des décisions qui ont abouti à la construction de notre monde, l'histoire nous ouvre des libertés pour le présent. Par exemple, elle montre que la pétrolisation du monde est le résultat de choix politiques et militaires. Elle est tout d'abord le fruit de l'urbanisation de la périphérie des villes et de la motorisation des sociétés occidentales – un processus encouragé par les dirigeants américains conservateurs pour lutter contre le communisme : la périurbanisation défaisait les solidarités ethniques et sociales qui avaient été le support des solidarités ouvrières et des grandes grèves en 1917 et 1946. Les militaires ont aussi joué un grand rôle. Notamment, la logistique du pétrole est sortie transformée de la Seconde Guerre mondiale : pipelines et capacités de raffinage ont augmenté de façon brutale pour répondre aux besoins militaires.

En nous aidant à identifier des institutions, des élites sociales, des systèmes matériels puissants qui nous ont fait basculer dans l'Anthropocène, l'histoire nous indique sur quels leviers décisionnaires des contraintes politiques fortes doivent être appliquées en priorité.

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



Le zappeur et le chercheur

La profusion d'informations disponibles conduit au zappage, qui n'est pas forcément à déplorer : ce mode de connaissance se rapproche de celui des chercheurs.

Depuis l'invention du Web, en 1990, nous sommes tous devenus des « zappeurs » : nous avons pris l'habitude de sauter d'une information à une autre, au lieu de rester concentrés sur la première. Cela nous donne une connaissance fragmentée, constituée d'une multitude d'articles de journaux auxquels nous avons juste jeté un coup d'œil, de livres que nous avons commencés sans les terminer, ou de morceaux de cours que nous avons suivis en dilettante, sans aller jusqu'à passer l'examen.

Il faut sans doute relativiser ce jugement quand on connaît le nombre de lecteurs qui sont venus à bout des 606 pages de *Harry Potter* – de fait, la longueur des œuvres de fiction ne cesse d'augmenter, notamment avec les séries télévisées. Mais il est probable que l'abondance d'informations augmente notre propension à leur réception partielle.

Ce phénomène n'est pas difficile à expliquer. Au XX^e siècle, voir un film exigeait de se déplacer jusqu'à une salle de cinéma, de se faire à une heure précise, d'acheter une place... et même si le film nous ennuyait un peu, nous restions jusqu'au bout, car il était difficile de changer de salle pour aller voir un autre film peut-être meilleur. En revanche, quand nous regardons le même film en flux continu, sur un ordinateur ou une tablette, il est très facile d'en changer, si celui que nous regardons ne nous plaît pas.

Une façon plus positive de présenter les choses serait donc de dire que l'abon-

dance d'informations nous a rendus plus sélectifs. Car quel intérêt y a-t-il à terminer un mauvais film, sous prétexte que nous l'avons commencé ? De même, le fort « taux de décrochage » des cours en ligne peut être interprété comme le fait que ces cours, contrairement aux cours en chaire, attirent des curieux désireux de s'initier à, disons, l'écriture cunéiforme, mais qui n'ont aucune intention de passer un diplôme d'assyriologie, ni de devenir capables de lire l'*Épopée de Gilaamesh* dans le texte.

L'encyclonédisme fragmenté auquel donne lieu le zappage pourrait devenir l'un des objectifs de l'école.

Le point peut-être le plus intéressant est que l'organisation des connaissances du zappeur rapproche ce dernier du chercheur. À l'image d'Épinal du savant qui sait tout s'est substituée celle du chercheur qui sait tout sur son domaine de recherche, mais est totalement ignorant dès que l'on en sort. Cette seconde caricature est bien entendu aussi fausse que la première : outre des connaissances spécialisées et opérationnelles dans son domaine, un chercheur a aussi une multitude de connaissances disparates sur des sujets voisins, venues d'un article lu mais oublié, d'un séminaire écouté distraitement, d'une conversation avec un collègue, d'un article lu dans *Pour la Science*, etc.

Comme le zappeur, le chercheur est – depuis longtemps, avant même l'arrivée du Web – bombardé d'informations : articles, conférences, séminaires, etc., et s'il intègre une partie de ces informations en des connaissances structurées, il laisse aussi s'accumuler dans son cerveau une foule de connaissances fragmentées. Ces dernières jouent d'ailleurs un rôle central dans sa dynamique intellectuelle, car elles balisent le terrain sur lequel il pourra, plus tard, développer des connaissances plus structurées.

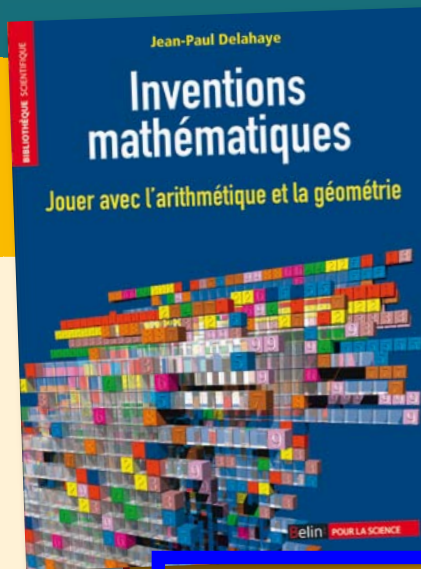
Le développement du zappage serait donc simplement la généralisation à la population entière d'un mode de connaissance que les chercheurs expérimentent depuis longtemps.

Ce nouvel encyclopédisme fragmenté pourrait devenir l'un des objectifs de l'école : les lycéens savent aujourd'hui parfaitement résoudre les équations du deuxième degré, mais la plupart ignorent qu'il existe aussi des méthodes similaires pour résoudre les équations du troisième et du quatrième degré, et qu'il ne peut pas en exister au-delà. Sans avoir appris les détails des méthodes de Cardan et Ferrari – que beaucoup de mathématiciens de métier ignorent –, il ne serait pas inutile qu'ils en aient entendu parler, autrement dit que l'école intègre une part de ce que l'on appelait au XX^e siècle la « vulgarisation ».

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

L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



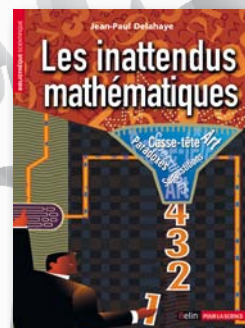
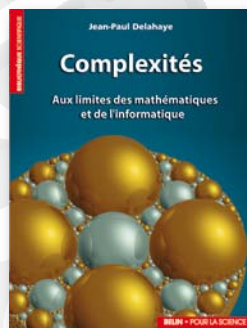
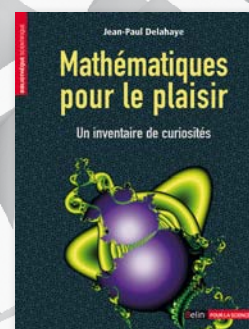
NOUVEAU !

A l'occasion de la parution de son nouveau livre **Inventions Mathématiques**, redécouvrez l'ensemble de ses ouvrages parus dans la collection Bibliothèque scientifique

Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique et la géométrie

Les mathématiques sont vivantes et l'imagination des chercheurs et des amateurs n'est jamais en repos. Sans cesse, de nouvelles idées conduisent à des inventions qui réjouissent, étonnent et instruisent. Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, des énigmes élémentaires ou complexes, ou encore des images grises où la cryptographie cache des visages et des animaux. Vous serez étonné... à chaque page !



Retrouvez Jean-Paul Delahaye chaque mois dans la rubrique "Logique et calcul" de *Pour la Science* !

Jean-Paul Delahaye est professeur d'informatique à l'Université des sciences et technologies de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale du CNRS, à Lille

POUR LA SCIENCE

Pour commander ces ouvrages, rendez-vous sur www.pourlascience.fr

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES chronique de Gérald Bronne

Dessine-moi une ville écologique !

Il y a parfois un fossé entre les représentations que nous nous faisons de l'écologie et la réalité : qui pourrait croire que New York est la ville la plus écologique des États-Unis ?

Supposons que l'on vous demande d'imaginer et de dessiner en quelques minutes à quoi pourrait ressembler une ville écologique.

Vous mettriez sans doute en avant des éléments qui vous paraîtraient fondamentaux : des espaces verts, des maisons individuelles dans un environnement plutôt champêtre, peut-être ajouteriez-vous quelques éoliennes et panneaux solaires pour faire bonne mesure.

C'est du moins à cette conclusion que je suis parvenu en me livrant à cette petite expérience avec quelques promotions d'étudiants. Leurs dessins ne pourraient pas vraiment être exposés dans des musées, mais ils révèlent un certain imaginaire de la ville écologique. Parmi la soixantaine d'ébauches recueillies, seuls 12 pour cent mentionnent le traitement vert des déchets et 33 pour cent prennent la peine de dessiner des sources d'énergies renouvelables.

En revanche, la question des déplacements est mieux prise en compte, puisque 53 pour cent des dessins figurent des vélos ou des transports en commun : l'ennemie, c'est la voiture. Bien plus obsédants sont les thèmes de la verdure et des maisons à « taille humaine ». Ainsi, 72 pour cent des dessins présentent des villes constituées de maisons individuelles, 86 pour cent des espaces verts et 77 pour cent représentent des zones urbaines étalées. Rares sont les croquis qui mettent en scène une ville à forte compacité. Et pourtant...

C'est en appliquant de tels principes que le magazine américain *Forbes* a décerné la palme de la région la plus écologique des

États-Unis au Vermont. N'est-il pas vrai qu'il s'agit de la région bucolique par excellence, que les habitants vivant dans de belles maisons individuelles sont attentifs au tri sélectif, et qu'ils ont une conscience forte des enjeux écologiques ? Sans doute est-ce à une description des habitants du Vermont, mais, en même temps, on doit constater que dans tous les domaines qui concernent l'impact écologique d'une population, leur bilan est catastrophique.



UNE VILLE ÉCOLOGIQUE du futur

Par exemple, un habitant de cet État consomme 2 000 litres d'essence par an, soit près de 400 litres de plus qu'un Américain moyen ! D'une façon générale, son bilan carbone est très mauvais. Pourquoi ? Principalement en raison d'une caractéristique qui rend cette région si attractive : son étalement urbain. Ainsi, imaginer des immeubles à taille humaine, un cadre verdoyant, des chemins sur lesquels on peut flâner, etc., conduit nécessairement à un tissu urbain lâche qui rend les transports collectifs inefficaces et la voiture indispensable.

À ce point de notre réflexion, nous arrivons à une conclusion contre-intuitive : la

ville la plus écologique des États-Unis est en fait New York ! Elle ne correspond pas du tout à notre imaginaire écologique et, pourtant, les New-Yorkais sont moins énérgivores que leurs concitoyens, ils ont un bien meilleur bilan carbone avec un taux d'émission de dioxyde de carbone inférieur de 30 pour cent à la moyenne américaine. Les transports collectifs y sont rois, on y trouve près de la moitié des stations de métro du pays. Il faut dire qu'ailleurs, aux États-Unis, on possède en moyenne deux voitures par ménage, voire trois, tandis qu'à Manhattan 77 pour cent des citadins n'ont pas d'automobile. En effet, cette ville est d'une extrême compacité avec 10 000 résidents par kilomètre carré. Cette densité réduit l'étalement urbain, ce qui est favorable aux transports collectifs et aux immeubles à logements multiples, les bâtiments ayant la meilleure efficacité énergétique.

En d'autres termes, si New York est la ville la plus écologique des États-Unis, ce n'est pas parce que ses habitants sont plus vertueux, mais seulement parce qu'ils vivent les uns sur les autres. La taille des logements et la distance moyenne entre chaque logement sont des données plus déterminantes que la sensibilité et la bonne volonté écologique des populations. Car cette sensibilité peut nous conduire à nous éloigner des villes, pour vivre dans un cadre pastoral, la pire décision écologique qui soit. L'enfer vert est pavé lui aussi de bonnes intentions...

Gérald BRUNNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot

Les deux temps de la science et des médias

par Richard Taillet, sur *Signal sur bruit*

En mars dernier, la communauté des cosmologistes a été secouée par l'annonce d'un résultat fondamental obtenu par l'expérience BICEP2 : l'analyse du rayonnement micro-onde semblait révéler, de façon indirecte, l'existence d'ondes gravitationnelles primordiales, et, de façon encore plus indirecte, appuyer l'hypothèse de l'inflation, une phase d'expansion accélérée dans l'Univers primordial. Cette annonce a eu d'autant plus d'impact qu'elle faisait le pion à *Planck*, un instrument spatial d'un demi-milliard d'euros dont le principal objectif est précisément d'étudier cette question, et dont la mission d'observation vient de s'achever pour entrer dans la phase d'analyse des données.

Or l'article scientifique rapportant les résultats de BICEP2, qui a été présenté le 19 juin sous sa forme finale, validée par le comité de lecture de la revue *Physical Review Letters*, est beaucoup plus prudent que l'annonce médiatisée. En particulier, il n'est pas exclu que l'effet mesuré soit dû en partie à d'autres causes que les ondes gravitationnelles, notamment la présence de poussières en avant-plan.

Il n'y a aucun scandale dans cette histoire. C'est la marche normale de la communication scientifique : des chercheurs présentent un résultat intéressant, d'autres le commentent, le mettent à l'épreuve, le contestent ou l'acceptent. De ce fait, l'acceptation d'un résultat scientifique nouveau prend du temps. En physique, on nomme temps de relaxation le temps que met un système pour retrouver un état d'équilibre après avoir été perturbé. Le temps de relaxation associé aux découvertes scientifiques est de l'ordre de quelques mois, voire quelques années.

Or ces durées sont très supérieures à celles des dynamiques de communication

médiatique : quelques semaines ou quelques jours, voire quelques heures ! Cela peut devenir un problème lorsque la communication médiatique interfère avec l'activité scientifique, créant des perturbations sur des échelles de temps beaucoup trop courtes. C'est ce qui s'est passé en 2011 avec l'affaire des neutrinos supraluminiques. L'annonce d'un résultat très surprenant par l'équipe de l'expérience OPERA a été relayée presque immédiatement par un très grand nombre de médias (d'ailleurs, les chercheurs eux-mêmes ont joué un rôle actif dans cette diffusion), ce



Le télescope BICEP2 (à gauche), situé en Antarctique, aurait détecté dans le fond diffus cosmologique la trace des ondes gravitationnelles primordiales.

qui a finalement conduit à la démission d'un des responsables de l'expérience quelques mois plus tard, lorsqu'il est devenu clair que l'effet observé était un biais instrumental. Notons qu'une erreur expérimentale n'a rien de honteux, et ce n'est pas cela qui a conduit à la démission du responsable, mais bien la gestion de la communication.

Dans le cas de BICEP2, le caractère hâtif de la communication a peut-être influé sur la recherche dans ce domaine. En particulier, dans quelle mesure l'activité de la collaboration *Planck* a-t-elle été affectée par cette annonce ?

Ce problème n'est pas nouveau, mais il est amené à prendre de plus en plus d'importance, les scientifiques n'hésitant plus à passer par des canaux de communication plus rapides que la traditionnelle (et efficace) procédure « soumission/approbation/publication » dans des revues spécialisées. Et ce, sans doute parce que l'avenir d'une expérience est déterminé par des décideurs qui ne sont pas toujours des spécialistes du domaine et qui ne lisent probablement pas les articles scientifiques en question.

La communication scientifique et la diffusion médiatique diffèrent aussi sur un autre point : le sens de la nuance. Il est difficile pour un journaliste de présenter un résultat incertain (sauf s'il est accompagné d'une polémique) et de rendre compte de toutes les précautions qui l'entourent. À l'inverse, il est impossible pour des scientifiques de publier un résultat qui ne soit pas accompagné d'une analyse critique et d'une discussion indiquant les points faibles de l'analyse et les façons dont elle pourrait être remise en cause.

Aussi, lorsque la science est présentée comme un ensemble de savoirs plus que comme une démarche, son image en pâtit. Savoir contourner cet écueil différencie les bonnes revues de vulgarisation des autres.



Richard TAILLET, professeur à l'Université de Savoie et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh), anime le blog *Signal sur bruit* (<http://www.scilogs.fr/signal-sur-bruit>).



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux

La généalogie des mythes

Julien d'Hul

Plusieurs familles de mythes se propagent dans l'humanité depuis des temps immémoriaux. En analysant leurs traits caractéristiques comme le font les biologistes pour découvrir les liens de parenté entre espèces, on retrace leur évolution depuis la Préhistoire.

Artémis avait pour suivante la plus belle des nymphes, Callisto (du grec *kallisté*: «la plus belle»). La déesse de la chasse avait exigé qu'elle fasse vœu de chasteté, mais Zeus, le père d'Artémis, l'éprouva, et... qui peut résister à Zeus? Au bain, Artémis découvre le ventre rond de Callisto et, folle de rage, la chasse. Après la naissance de son fils Arcas, Callisto est transformée en ourse par Héra, l'épouse jalouse de Zeus, et doit donc vivre dans les montagnes sauvages. Un jour, Arcas, devenu chasseur, la croise. Il ne reconnaît pas sa mère et la tue. Zeus intervient alors et place la nymphe dans le ciel où, depuis, brille la constellation de la Grande Ourse.

Cette histoire appartient à une vaste famille de mythes, ceux dits de la Chasse cosmique. Elle se retrouve sous des variantes plus ou moins différentes dans les mythologies d'Afrique, d'Europe, d'Asie et des Amériques. Plusieurs autres grandes familles de mythes ont aussi des diffusions planétaires. Cette constatation nous a conduits à appliquer aux diverses versions d'une même famille de mythes les méthodes phylogénétiques des biologistes, qui permettent d'établir des liens de parenté entre les espèces du vivant. Il s'agissait de relier les versions successives et de construire

des arbres de parenté retraçant l'évolution des mythes au fil des temps. Nous avons ainsi pu montrer que trois grandes familles de mythes – les mythes de type Chasse cosmique, les mythes de type Pygmalion et ceux de type Polyphème (voir la figure 1) – vérifient des lois évolutives comparables à celles des espèces. Quelles sont ces lois? Et comment les avons-nous mises en évidence?

Comme les êtres vivants, toutes les versions d'un même mythe ont des ancêtres, qui jouent les mêmes rôles tenus en biologie par l'«Ève mitochondriale» (la femme à l'origine de l'ADN mitochondrial de l'humanité moderne, ADN des mitochondries des cellules qui n'est transmis que par les femmes) et par l'«Adam Y» (l'homme à l'origine du chromosome sexuel masculin, transmis seulement par les hommes).

Lorsqu'une génération reçoit en héritage un récit de la génération précédente, elle en conserve la plupart des traits, tout en ajoutant plus ou moins consciemment quelques innovations. Un comportement que l'anthropologue Claude Lévi-Strauss (1908-2009) avait bien observé, lorsqu'il disait qu'«on ne discute pas les mythes du groupe; on les transforme en croyant les répéter.»

1. LE CYCLOPE POLYPHEME (ici recevant un pieu dans l'œil), contre lequel luttait Ulysse, est une version grecque de l'un des plus anciens mythes de l'humanité.



L'ESSENTIEL

Trois des nombreuses familles de mythes sont particulièrement riches et anciennes : les Chasses cosmiques, les mythes de type Pygmalion et ceux de tute Poluphème.

On peut décomposer chaque variante en ses « mythèmes », ses traits caractéristiques.

Appliquées aux mythèmes, les méthodes de la phylogénie fournissent des arbres de parenté entre mythes d'époques et de cultures différentes.

Ces arbres de parenté reflètent l'histoire du peuplement de la planète par les hommes modernes.

Dès lors, plus on s'éloigne de l'origine d'un mythe dans le temps, plus ce mythe se transforme. En 1951, la folkloriste suédoise Anna Birgitta Rooth a montré que le conte de Cendrillon serait né au Moyen-Orient, il y a 4 000 ans environ : il racontait alors qu'une vache, nourrissant un frère et une sœur orphelins de mère, est tuée par la marâtre des enfants ; de ses os enterrés naît cependant un arbre qui donne de la nourriture. Le récit aurait ensuite évolué : c'est désormais une fille seule, orpheline de mère, qui garde une vache nourricière tandis qu'elle accomplit des tâches de filage ; sur le corps de l'animal poussent toujours des fruits, que seul le prince qui épousera la jeune fille pourra cueillir.

Il y a 2 500 ans, dans les Balkans, serait apparue une nouvelle version : la vache, son rôle nourricier et son abattage sont toujours au cœur du récit, mais ce sont des habits magnifiques qui apparaissent là où l'animal est inhumé, donnant la possibilité à l'héroïne de se rendre à la fête du prince ; elle y perd sa pantoufle ; une fausse fiancée parvient, par ruse, à chausser cette dernière, mais elle est démasquée par un animal ; le prince peut alors se marier avec la bonne demoiselle.

Le mythe aurait ensuite migré à travers l'Europe de l'Est vers la Scandinavie, qu'il aurait atteint vers l'an 1000 ; à ce moment serait apparue notre Cendrillon actuelle, qui n'aurait guère évolué depuis : seule la deuxième partie du récit, où une jeune fille vivant dans les cendres affronte une marâtre et ses filles, y est conservée.

Par ailleurs, lorsqu'un groupe humain se divise en deux sous-groupes emportant le même récit (les Scythes de la mer Noire et ceux de l'Altai par exemple), les versions des descendants de ces deux nouvelles populations divergent progressivement. Quentin Atkinson, de l'Université d'Auckland en Nouvelle-Zélande, et deux collègues australiens l'ont récemment mis en évidence en montrant, dans le cas du conte européen des Deux sœurs, que plus deux populations sont distantes géographiquement, plus leurs versions d'un même conte divergent.

Par exemple, dans la plupart des versions islandaises de ce récit, trois filles sont envoyées hors de chez elles, l'une après l'autre, pour chercher du feu. Les deux aînées s'adressent méchamment à un vieil ermite qu'elles rencontrent et,

L'EVOLUTION AU FIL DU TEMPS DES MYTHES DE CHASSE COSMIQUE

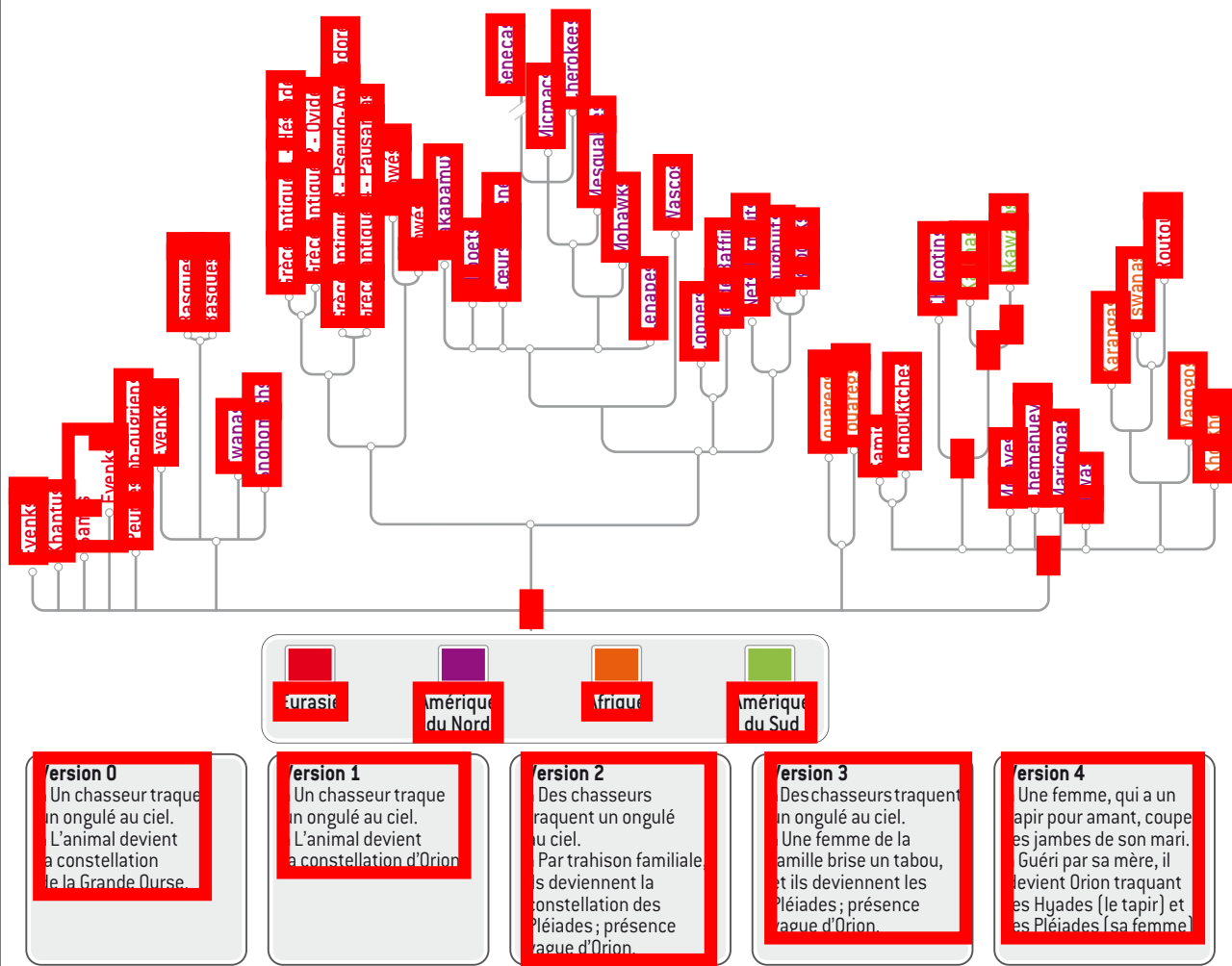
Cet arbre de parenté des versions de la Chasse cosmique est construit à l'aide d'un programme calculant les arbres possibles les plus vraisemblables (reproduisant les versions connues du mythe), à l'aide d'un algorithme dit bayésien ; ce programme ne retient dans l'arbre final que les branchements apparaissant dans la moitié au moins des arbres reconstruits. L'arbre comporte plusieurs branches continues dont la longueur dépend du nombre de pas évolutifs entre les versions reliées. Toutes dérivent d'une version originelle paléolithique, la version 0, que l'on peut reconstruire ainsi : *Un gros mammifère, herbivore et cornu – un ongulé, sans doute un élan – est poursuivi par un humain. La chasse a lieu au ciel ou les y conduit. L'animal, encore vivant, s'y transforme en constellation : la Grande Ourse.*

La première diversification de ce mythe originel produit neuf variantes du mythe en Eurasie, dont une passe en Afrique et deux, successivement, en Amérique. Parmi elles, la version 1 aboutira notamment aux versions connues pour les Chilcotins, les Kalin'as et les Akawaïos, ainsi que pour des peuples africains. Cette version, disparue aujourd'hui, peut être reconstruite ainsi : *Un gros mammifère, herbivore et cornu – un ongulé – est poursuivi par un humain. La chasse les conduit au ciel. L'animal, encore vivant, s'y transforme en constellation : Orion.*

L'octuple divergence qui se produit ensuite engendre notamment la famille CKA (Chilcotins-Kalin'as-Akawaïos) dont les mythes trouvent tous leur origine dans la version 2 : *Un gros mammifère, herbivore et cornu – un*

ongulé – est poursuivi jusqu'au ciel. L'animal, déjà mort, se transforme en constellation. Par la faute d'un membre de la famille, les chasseurs sont transformés en Pléiades. Dans ce récit, Orion tient un rôle, mais indéterminé.

Finalement, tandis que les Chilcotins de Colombie Britannique en restent à cette version, les peuples caraïbes des Kalin'as et des Akawaïos la modifient pour que le membre de la famille devienne une femme brisant un tabou. Ce changement confère une plus grande utilité sociale à la version résultante, la version 3, qui est à l'origine de celle des Kalin'as et des Akawaïos : *Un gros mammifère, herbivore et cornu – un ongulé, probablement un tapir – est poursuivi dans le ciel ou jusqu'au ciel. L'animal, déjà mort, se transforme en constellation. Par la faute d'un membre de leur famille, une femme qui brise un tabou, les chasseurs sont transformés en Pléiades. Orion tient un rôle, mais indéterminé, dans ce récit.* Les Akawaïos, reprenant ce récit, ajoutent un adultère et plusieurs constellations, ce qui donne la version 4 : *Une femme prend pour amant un tapir. Celui-ci lui promet de l'emmener vers l'Est, là où le ciel et la terre se rencontrent. Elle profite alors que son mari légitime monte dans un arbre pour lui couper les jambes. La mère du mari guérit le malheureux. En s'appuyant sur une béquille, il se met à poursuivre les amants, qu'il finit par rejoindre. Il coupe aussitôt la tête du tapir. La femme et l'esprit de l'animal s'envolent au ciel, poursuivis par le mari jaloux. Les Hyades forment la tête de l'animal, les Pléiades sont la femme métamorphosée, tous deux poursuivis par Orion, le mari.*



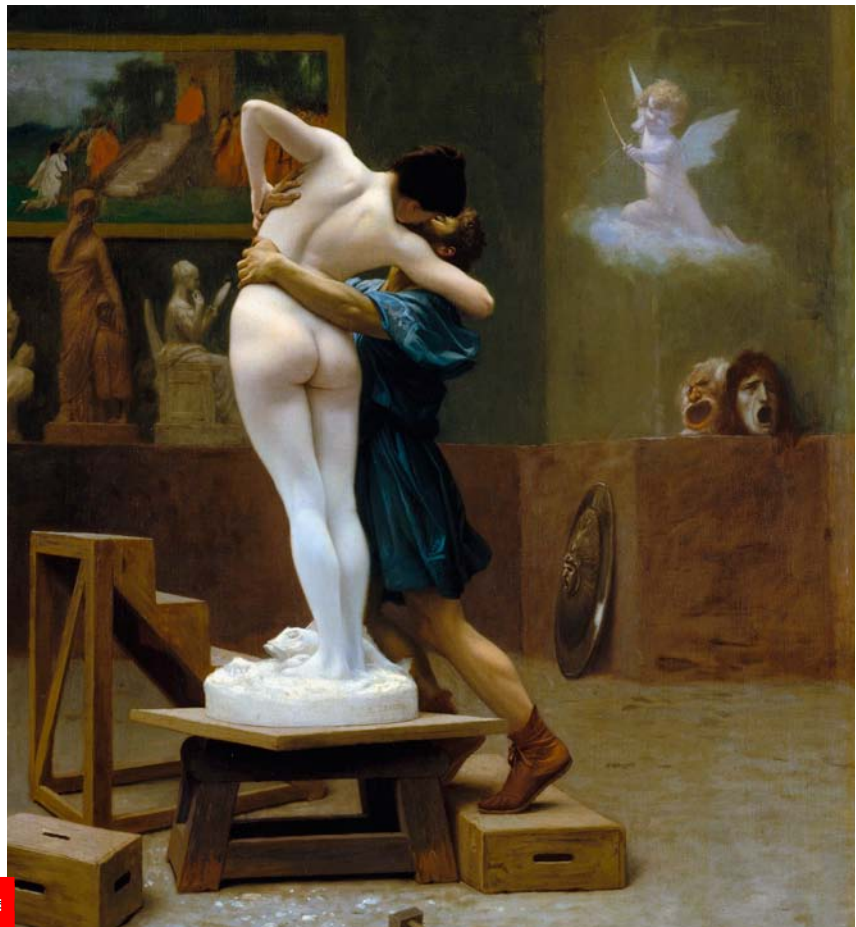
au retour, se font mordre par un chien; la plus jeune s'adresse avec gentillesse au vieillard et reçoit en récompense un coffre rempli de magnifiques habits. Un prince passe alors, qui néglige les deux aînées, défigurées par la morsure, et choisit de se marier avec la cadette.

Dans l'Est et le Sud de l'Europe, on raconte plutôt qu'une jeune fille, malheureuse victime de la seconde épouse de son père, est envoyée chercher des fraises en forêt en plein hiver. Elle y fait la rencontre des douze mois, qui ont pris la forme de douze vieillards, et leur demande poliment de l'aide. Ils lui donnent alors des fraises. La fille de la marâtre, envoyée à son tour chercher des fraises, est victime de son mauvais comportement et les douze vieillards la tuent. Comme on peut le constater, les versions de régions distantes ont fortement divergé.

Chasse cosmique : influences géographiques

Cette influence de la géographie sur les mythes est particulièrement évidente dans le cas des versions de la Chasse cosmique. Dans ce type de récit, un homme pourchasse un animal ou le tue, et les deux êtres se transforment en constellation(s). Chez les Inuits du Nord-Est de l'Amérique, trois chasseurs poursuivent un ours. Le sang de la bête blessée teinte les feuilles de la forêt automnale. L'animal gravit alors une montagne et, d'un saut, atteint le ciel. Les chasseurs et l'animal deviennent alors la constellation de la Grande Ourse. Chez les Tchoukhtches, un peuple de Sibérie, la constellation d'Orion est un chasseur qui poursuit un renne : Cassiopée. Dans les traditions sibériennes ougriennes, l'animal poursuivi est un élan et prend la forme de la Grande Ourse. Comme l'illustrent ces trois exemples, l'animal change, la constellation aussi (voir la figure 6), mais pas la structure du mythe.

La diffusion de ces récits à travers le monde ne peut pas s'expliquer par une structure psychique universelle. En effet, s'il en était ainsi, on devrait retrouver des Chasses cosmiques partout; or elles sont quasi absentes d'Indonésie, de Papouasie et d'Australie, mais présentes des deux côtés du détroit de Béring qui, on le sait, est resté émergé plus de 10 000 ans, entre 25 000 et 40 000 ans avant notre ère. L'hypothèse la plus simple serait donc que la diffusion de



2. LES MYTHES DE TYPE PYGMALION (ici Pygmalion et Galatée, par J.-L. Gérôme) racontent l'histoire d'un homme qui, pour compenser sa solitude, se sculpte une compagne de bois ou de pierre, laquelle s'anime. Dans la version grecque, Pygmalion, sculpteur et roi de Chypre, désespéré de ne pas trouver la beauté parfaite, finit par la sculpter. Il en tombe amoureux, puis, déçu par la froideur de son ivoire, implore Aphrodite de lui envoyer une femme vivante aussi belle. Émue, la déesse exauce le vœu de Pygmalion en donnant vie à l'œuvre qu'il a créée.



3. LES MYTHES DE TYPE POLYPHÈME (ici Polyphème et Ulysse par J. Jordaens) racontent l'histoire d'un chasseur bloqué par un monstre berger dans une grotte et qui s'échappe en se dissimulant parmi les bêtes. Dans la version grecque (Homère), ce monstre est le cyclope Polyphème, et le chasseur est remplacé par Ulysse et ses compagnons, qui réussiront à se sauver après avoir crevé l'œil du cyclope et s'être attachés sous les ventres des moutons. Furieux, Polyphème fait sortir ses moutons en les tâtant afin de repérer les hommes. En vain.

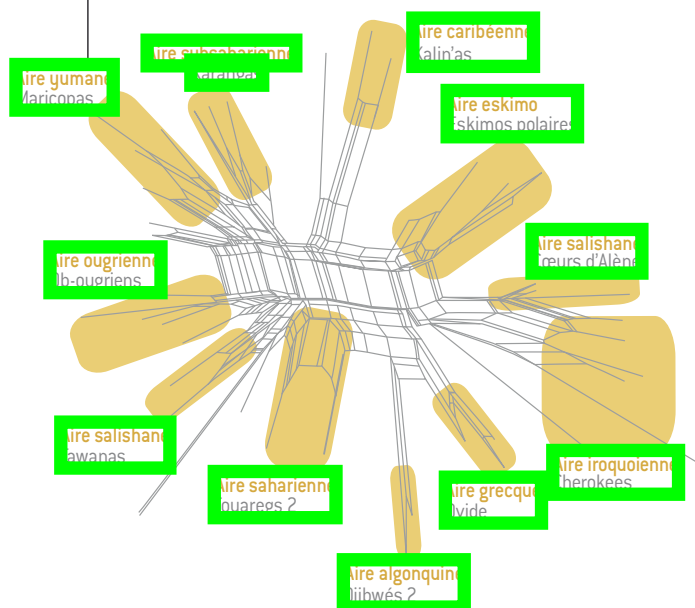
LES GRANDES AIRES CULTURELLES DE LA CHASSE COSMIQUE

Les différentes versions de la Chasse cosmique sont placées en dessous en fonction de leurs proximités (nombre de mythes communs) et de leurs différences, au bout de branches.

d'autant plus longues que beaucoup d'inventions les séparent du mythe prototype; des entretoises expriment les emprunts, inversions et autres échanges entre mythes voisins, voire des inven-

tions identiques en des lieux différents. Malgré ces interactions, on remarque que la plupart des versions se regroupent dans un certain nombre d'aires culturelles: l'aire ougrienne qui inclut les Ob-ougriens (Mansis, Khanty, ethnies du Nord russe et Hongrois) et les Samis (les Lapons); l'aire saharienne (Touaregs 1 et 2); l'aire subsaharienne (Khoikhoïs, Tswanas, Karangas et Ndogos); l'aire grecque (Hésiode, Ovide, Pausanias, Pseudo-Apollodore), l'aire eskimo (pseudo-Apollodore), l'aire eskimo polaire (Netsilik, Igloodiks), l'aire salishane (Snhomish, Twanas; Nlaka-pamux, autant d'ethnies d'Amé-

rique du Nord-Ouest); l'aire iroquoienne et alentours immédiats (Mohawks, Meskwakis, Mi'kmaq, Cherokees, Senecas, soit autant d'ethnies du Sud du Saint-Laurent); l'aire algonquienne (Ojibwés 1, Ojibwés 2, ethnies du Nord du Saint-Laurent et de la région des Grands lacs), l'aire yumane (Maricopas, Kiliwas, Mojaves, soit autant d'ethnies dans les États-Unis du Sud-Ouest, au Mexique et en Basse-Californie); l'aire caribéenne (Kalin'as, Akawaïos). Les emprunts et autres inversions semblent donc surtout locaux et récents, tandis que les héritages de mythes sont surtout anciens et d'origine lointaine.



Le type de récits aurait débuté en des temps assez reculés pour que les ancêtres européens des premiers Américains emmènent avec eux le mythe. La Chasse cosmique serait donc paléolithique et sans doute antéglaciaire.

Comme la Chasse cosmique, les deux autres grandes familles de mythes que nous avons étudiées – les mythes de type Polyphème et ceux de type Pygmalion – sont caractérisées par une certaine progression géographique. Présents en Europe et en Afrique, les mythes de type Pygmalion évoquent un homme qui crée une sculpture et en tombe amoureux. Dans la version grecque d'Ovide, un homme, déçu par les femmes réelles, réalise une sculpture de marbre et s'en éprend. Il l'habille, lui parle, la caresse. Émue, Vénus rend cet amour possible en donnant vie à l'objet (voir la figure 2). Chez les Vendas d'Afrique australe, un homme sculpte dans un bloc de bois une femme. Le chef de la tribu veut s'en emparer. Le sculpteur s'y oppose, jette la femme à terre où elle redevient bois.

Dans les mythes de type Polyphème, un homme s'aventure dans une grotte, dont le propriétaire est un monstre, et ne

L'AUTEUR



Julien d'HUY, docteur en anthropologie, est rattaché à l'Institut des Mondes Africains (UMR 8121), à Paris.

BIBLIOGRAPHIE

J. d'Huy et J.-L. Le Quellec, Comment reconstruire la préhistoire des mythes? Applications d'outils phylogénétiques à une tradition orale, P. Charbonnat, M. Ben Hamed et G. Lecointre (dir.), Appareiller la pensée?, Éditions Matériologiques, pp. 145-186, 2014.

J. d'Huy, A Cosmic hunt in the Berber sky: A phylogenetic reconstruction of Palaeolithic mythology, *Les Cahiers de l'AARS*, vol. 15, pp. 93-106, 2013.

J. d'Huy, Polyphemus [Aa. Th. 1137], a phylogenetic reconstruction of a prehistoric tale, *Nouvelle Mythologie comparée*, 1, 2013, en ligne.

se tire de ce mauvais pas qu'en se glissant dans un troupeau quittant le lieu, sous l'œil pourtant attentif du propriétaire.

En Europe, il s'agit souvent d'un troupeau de moutons. Ainsi, dans la version grecque, le monstre est le cyclope anthropophage Polyphème (d'où le nom de ce type de mythes), l'homme étant Ulysse qui s'est aventuré dans sa grotte-bergerie. Le cyclope trahit les devoirs de l'hospitalité, et Ulysse et ses compagnons ne parviennent à s'échapper qu'en s'attachant sous le ventre des moutons du monstre, après lui avoir crevé l'œil à l'aide d'un pieu durci au feu (voir les figures 1 et 3).

Polyphème en Amérique

On retrouve des récits similaires en Amérique du Nord. Par exemple, les Pieds-Noirs, peuple de la famille algonquienne, racontent une histoire où Corbeau (à la fois homme et oiseau chez les Amérindiens) cache les bisons dans une grotte. Capturé, il est placé au-dessus d'une bouche de fumée, ce qui explique que, depuis, les Corbeaux sont noirs (cela rappelle l'usage du feu pour se venger de Polyphème). Corbeau promet alors de libérer les animaux. Mais, une fois libre, à l'instar du cyclope grec, Corbeau trahit sa promesse. Deux héros se transforment alors, l'un en bâton, l'autre en chiot. La fille de Corbeau les recueille et les amène

lans la grotte. Les deux compagnons s'y retransforment, l'un en gros chien, l'autre en homme, puis conduisent les bisons à la surface. Pour ne pas être repérés par Corbeau, qui veille à l'entrée, prêt à les tuer, ils se cachent tous deux sous la toison d'un bison et parviennent ainsi à s'échapper.

Comment établir les relations de parenté dans le temps et l'espace entre les mythes de chaque famille ? Pour ce faire, nous avons d'abord transformé chaque récit en une série de phrases les plus courtes possibles : les « mythèmes » (néologisme emprunté à Claude Lévi-Strauss, construit sur le même principe que phonème ou morphème). Ces phrases peuvent par exemple être : « Il y a un héros » ou « Le héros est un chasseur ».

En rassemblant les phrases utilisées, nous avons défini des critères associés à chacune des trois grandes familles de mythes. Certains de ces critères sont propres à une ou deux versions, d'autres à l'ensemble des récits. Chaque version au sein d'une famille peut donc être définie par une liste de caractères spécifiques, similaires aux caractères des mots (par exemple les morphèmes dont ils sont faits) ou aux caractères des espèces biologiques (leurs gènes par exemple). Selon la présence ou l'absence de tel ou tel mythème pour chaque version du mythe, nous les avons codés par un 1 (présence) ou un 0 (absence). Nous avons ainsi obtenu des lignes de code formant en quelque sorte le « code mythique » des

versions. Nous avons ensuite appliqué à ces séquences de 0 et de 1, caractérisant chaque version, les algorithmes statistiques dont se servent les phylogénéticiens pour comparer des espèces et établir des arbres de parenté.

Des algorithmes issus de la biologie

Les algorithmes que nous avons utilisés sont fondés sur l'hypothèse que les ressemblances entre les codes successifs d'une chaîne évolutive (génétique, mythique, etc.) sont dues à un lien de parenté plutôt qu'à une création spontanée (mutation dans le cas des gènes, invention dans le cas des mythes, etc.). Il s'agit alors de rechercher les chaînes de filiation où le nombre d'innovations (mutations, inventions) est minimal.

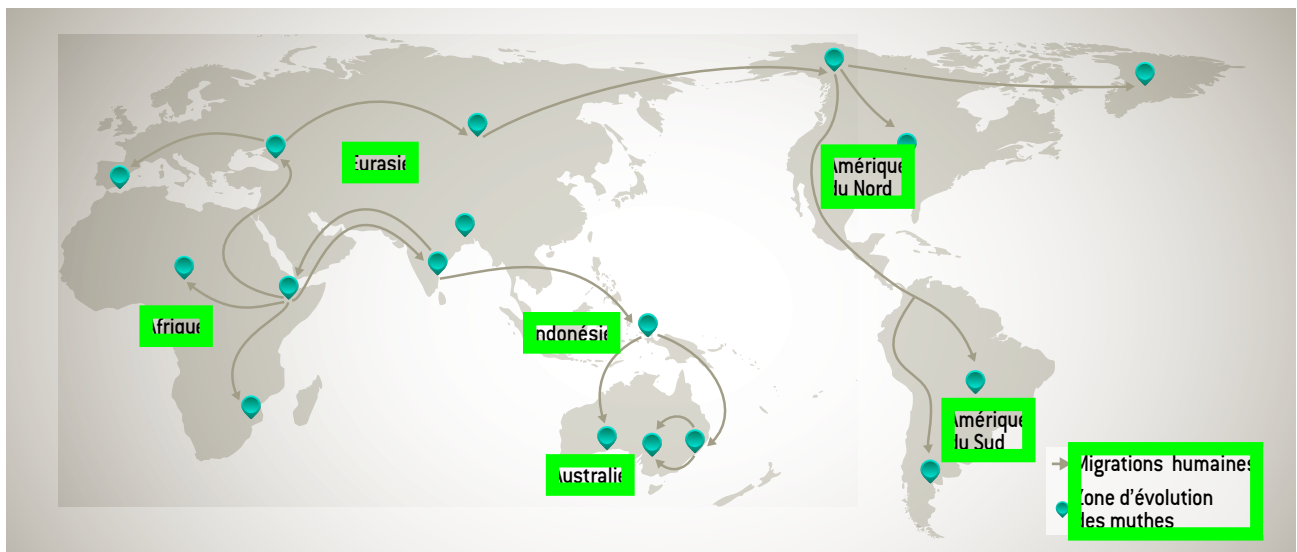
Dans le cas des gènes, cette logique permet d'établir des arbres de parenté – des « arbres phylogénétiques » – que l'on considère comme les plus vraisemblables ; dans le cas des mythes, on obtient des arbres de parenté entre mythes censés être les plus vraisemblables. Les arbres issus de cette méthode reposent donc sur l'hypothèse que deux versions d'un même mythe aux caractéristiques proches ont divergé depuis peu.

Qu'indiquent les arbres de parenté obtenus ? Comme attendu, les résultats présentent une progression géographique cohérente. L'arbre associé à la Chasse cosmique

montre que ce type de mythe est parvenu dans les Amériques à l'issue de plusieurs migrations successives, qui ont chacune apporté une version légèrement différente (voir l'encadré page 24). Les mythes de type Pygmalion, dont nous n'avons étudié que les versions africaines, s'organisent en un gradient allant du Nord au Sud du continent. Les récits mythologiques de type Polyphème ont progressé en Europe de la Méditerranée vers le Nord du continent d'une part, et vers les Pyrénées d'autre part, puis, par un effet retour, vers le Caucase.

Un problème se pose cependant. Avec le temps, les traits originaux d'une espèce s'atténuent, disparaissent ou encore s'effacent quand, à la suite de mutations, d'échanges entre espèces (symbioses, croisements, etc.) ou de dérives génétiques, de nouvelles caractéristiques s'amalgament au génome initial sans avoir été héritées. Dans le cas des mythes, ces nouvelles caractéristiques sont des emprunts à d'autres versions qui s'ajoutent au récit d'origine. Heureusement, les méthodes qu'emploient les biologistes pour étudier l'évolution des gènes peuvent être aussi appliquées pour estimer la part d'emprunt et la part d'héritage.

On calcule ainsi un indice de rétention, un outil statistique utilisé par les phylogénéticiens, qui mesure la fiabilité du résultat. Cet indice permet de mesurer le pourcentage de caractères communs à deux ou plusieurs versions, qui ne sont



4. LA CONQUÊTE DE LA PLANÈTE PAR *HOMO SAPIENS* débute il y a quelque 100 000 ans par la sortie d'Afrique de premiers groupes d'hommes anatomiquement modernes. Elle s'amplifie il y a environ 50 000 ans, quand des vagues successives d'hommes modernes arrivent en Europe, en Asie centrale et progressent par le Sud vers l'Aus-

tralie. Ce n'est qu'il y a quelque 20 000 ans, lorsque le détroit de Béling s'assèche durant la dernière glaciation, que plusieurs vagues humaines pénètrent en Amérique. Ces grandes phases migratoires des humains modernes se lisent dans la structure des arbres généalogiques des grands types de mythes.



5. LA SCÈNE DU PUIITS de la grotte de Lascaux (17 000 à 18 000 ans) est célèbre, car elle semble raconter une histoire, peut-être la confrontation malheureuse d'un homme et d'un bison blessé. La scène pourrait aussi être mythologique. En effet, le fait que la tête d'oiseau de l'homme ressemble à celle de l'oiseau sur son pieu, la possibilité qu'il soit en fait debout tandis que le bison fait une ascension, la présence d'un point de peinture inexplicable près du garrot de l'animal, etc., rendent envisageable que cette scène soit une Chasse cosmique.

pas hérités d'un ancêtre commun. Or son calcul confirme que la plupart des mythes ont hérité de leurs ancêtres et sont peu contaminés par des emprunts.

Lorsqu'un peuple emprunte un récit complet à un peuple voisin, il tend généralement à en inverser certains axes, transformant les femmes en hommes, le bas en haut, le cru en cuit, etc., au point d'obscurcir parfois les liens de filiation. Toutefois, les récits trop transformés sont le plus souvent exclus de l'actio de la famille mythologique étudiée, faute de pouvoir encore être identifiés.

Leur transformation indique en outre qu'ils sont le produit d'une diffusion secondaire : un mythe doit d'abord être connu avant d'être transformé. Aussi, à la condition de s'en tenir à une famille mythologique clairement identifiée, les éléments constitutifs de telle ou telle version sont rarement entièrement empruntés et les emprunts, lorsqu'ils ont lieu, restent partiels et localisés, de sorte qu'ils ne brouillent pas le message généalogique. On observe ainsi que malgré les différences, les versions d'une même grande famille de mythes sont groupées de façon cohérente, c'est-à-dire par continents, zones géographiques et aires linguistiques (voir l'encadré page 26). Cela témoigne d'une grande stabilité des récits à travers le temps.

Puisque, pour l'essentiel, les mythes sont hérités des générations précédentes et que, par ailleurs, les mythes sont liés à l'identité des peuples, les arbres de parenté racontent aussi l'histoire des migrations de

populations. Par exemple, on peut mettre en parallèle la diffusion du mythe de Pygmalion avec une migration de population du Nord-Est au Sud de l'Afrique qui aurait eu lieu il y a environ 2000 ans.

Des mythes qui suivent les migrations

Les récits de Polyphème ont suivi, eux, deux expansions : la première, paléolithique, a répandu le mythe en Europe et en Amérique du Nord ; la seconde, néolithique, est liée à la diffusion de l'élevage.

Enfin, l'arbre associé à la Chasse cosmique montre que le mythe est arrivé en Amérique en plusieurs fois. Dans cet arbre, une branche regroupe les versions grecque et algonquienne. On est surpris, mais cela recoupe le fait que les peuples porteurs des mythes grecs et algonquins partagent l'haplogroupe X2, un ensemble de gènes se transmettant de conserve et qui leur serait venu d'ancêtres eurasiens communs, qui vivaient il y a quelque 30 000 ans. Une autre branche montre un passage par le détroit de Béring, qui se prolonge par la suite dans l'aire esquimaude et au Nord-Est de l'Amérique. Enfin, une branche indique qu'une partie du mythe s'est diffusée de l'Asie vers l'Afrique et l'Amérique.

Tout indique donc que les mythes ne se diffusent pas seuls, mais suivent les peuples. Avec des collègues, Q. Atkinson a confirmé en montrant que les barrières ethnolinguistiques empêchent plus sûrement

le passage d'éléments de folklore qu'elles n'empêchent celui des gènes...

Lorsqu'on examine les arbres de parenté obtenus, on constate que les branches les plus longues sont celles qui contiennent le plus de nœuds (voir l'encadré page 24). Autrement dit, plus une branche a connu d'événements de différenciation (nœuds), plus les versions situées aux extrémités de cette branche ont évolué (longueur des branches).

Une telle relation signe ce que l'on appelle en biologie un équilibre ponctué : on parle d'équilibre ponctué quand les espèces restent stables (en équilibre) pendant de longues durées, puis évoluent très vite lors d'événements de spéciation (ponctuations). Il en irait de même pour les mythes, dont les ponctuations (phases d'évolution rapide) s'expliqueraient de plusieurs façons : d'abord par la déperdition de la mémoire culturelle due au faible effectif des groupes de migrants, ce qui corrobore le parallèle mis en évidence entre migrations humaines et évolution des mythes ; ensuite par la tendance des peuples rivaux à modifier leur mythologie pour se distinguer les uns des autres, phénomène bien documenté en ethnologie ; enfin, par une capacité toute humaine à réviser ses croyances en fonction de nouveaux apports environnementaux et culturels.

Toutefois, l'apport le plus intéressant de l'application des méthodes de la phylogénie à la mythologie comparée est de conduire à une solution originale du problème de l'origine des mythes. En effet, les biologistes ont développé des outils pour établir le portrait-robot de l'espèce qui est antérieure à un nœud de l'arbre. Ce sont ces outils qui ont conduit aux premières versions des grandes familles de mythes étudiées. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de quantifier la probabilité qu'un mytheme soit présent ou non dans le prototype d'origine. Elle est en outre réfutable et actualisable au fur et à mesure que de nouvelles versions sont prises en compte.

Notre phylogénie des mythes fait donc apparaître, en la quantifiant, d'un côté les déperditions culturelles et les emprunts, d'un autre côté la part d'héritage. Cette discrimination est une avancée par rapport à l'approche classique des folkloristes : ces spécialistes des contes, légendes et autres mythes ont en effet toujours procédé en supposant l'existence, pour chaque grande famille ancienne de mythes, d'une forme

unique et fondamentale. Nos résultats nuancent cette hypothèse en faisant apparaître la part de déperdition et d'emprunt aux mythes, mais ils la confortent aussi en la validant sur des bases phylogénétiques.

Ainsi, l'une des premières versions du mythe de Pygmalion aurait été la suivante : une femme est sculptée dans un tronc d'arbre par un homme qui veut briser sa solitude. Le dieu donne vie à la sculpture qui se transforme en une belle jeune femme. Elle devient la femme de son créateur, bien qu'un autre individu souhaite qu'elle devienne également sa compagne.

Remonter aux premières versions

Dans le mythe de Polyphème, tel que l'aurait entendu son premier public, des animaux sont enfermés dans une grotte.

Un chasseur y entre sans être invité et s'y retrouve enfermé par une lourde pierre. Un monstre tente de le tuer et, pour le découvrir, fait sortir les animaux, en scrutant chacun d'entre eux. Le héros parvient cependant à s'échapper en se cachant sous le ventre d'un animal.

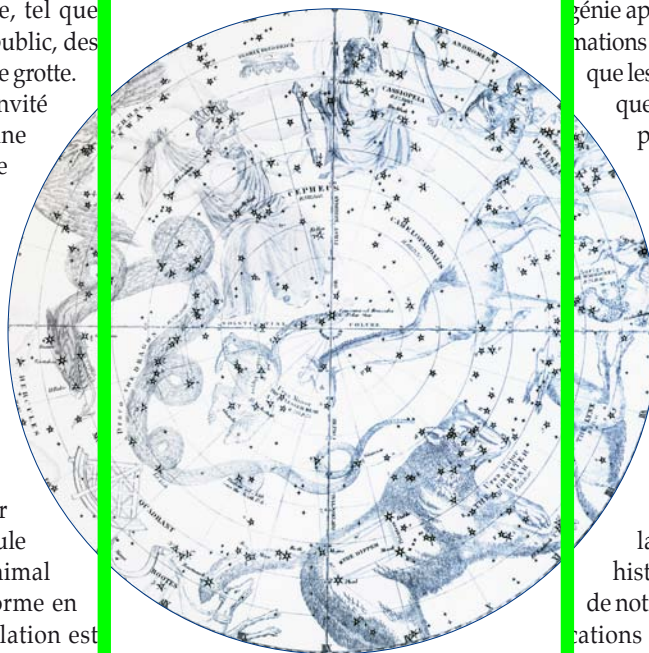
Enfin, la première version de la Chasse cosmique, ancêtre entre autres de l'histoire de Callisto, aurait été la suivante : un ongulé est pourchassé par un homme ; la chasse se déroule dans le ciel ou y aboutit ; l'animal est vivant quand il se transforme en constellation, et cette constellation est celle de la Grande Ourse.

Il est à noter que les récits reconstruits pour Polyphème et la Chasse cosmique remonteraient jusqu'au Paléolithique supérieur, autrement dit, bien plus loin que ne permet de remonter aujourd'hui la linguistique comparée.

La reconstruction du récit de Polyphème évoque la croyance, si répandue dans les cultures du passé, en l'existence d'un maître des animaux, qui les garderait dans une grotte. Or dans la grotte des Trois-Frères (dans les Pyrénées), fréquentée au Paléolithique supérieur, un panneau présente un petit être à tête de bison et corps humain, qui semble tenir un arc court. Perdu au milieu d'un troupeau de bisons, un autre animal, similaire à un bison, tourne la tête vers l'homme hybride, et les deux êtres

échangent un regard. Quand on observe la cuisse de l'arrière-train du « bison », on constate que ce n'est pas une cuisse de ruminant, mais que ses proportions sont plutôt celles d'une cuisse d'homme, beaucoup plus grêle, au point que le préhistorien André Leroi-Gourhan y a vu une silhouette humaine. Par ailleurs, l'artiste a détaillé l'anus et l'orifice vulvaire.

Ces deux éléments pourraient être mis en parallèle avec certaines versions amérindiennes du mythe de Polyphème, où l'homme se dissimule dans l'animal, en s'y introduisant par l'anus. Le fait que la peinture se trouve dans une grotte, le fait que l'être hybride (le monstre ?) tienne un arc et scrute du regard l'animal à la cuisse



humaine, que la scène ait été placée au milieu d'un troupeau, rappelle notre reconstruction du protomythe de Polyphème.

De même, la reconstruction du récit de la Chasse cosmique pourrait expliquer la célèbre scène du Puits à Lascaux (voir la figure 5). L'intrigant point noir isolé près du garrot du bison serait alors une étoile. La rigidité de l'animal, qui ne donne pas l'impression de charger réellement, s'expliquerait s'il représentait une constellation plutôt qu'une action. De plus, selon certains spécialistes, l'homme serait en réalité représenté redressé, et le bison en position ascendante, ce qui rappelle l'ascension au ciel de l'animal du protomythe. Enfin, des taches noires parsèment le sol sous l'animal,

5. LES CHASSES COSMIQUES constituent une famille de mythes si ancienne qu'elles se sont durablement inscrites dans notre imaginaire en peuplant le ciel d'animaux ou de personnages, même si elles ont varié beaucoup d'une culture à l'autre depuis le Paléolithique. Leur époque d'origine.

appelant le sang dont l'animal pourchassé teinte parfois les feuillages automnaux.

Il reste cependant délicat d'associer précisément un récit et une image paléolithique. Nous ne donnons ces exemples que pour illustrer le pouvoir interprétatif de notre méthode, qui permet de proposer des hypothèses solides et de ressusciter des récits disparus depuis bien longtemps.

Les méthodes statistiques de la phylogénie apportent ainsi de précieuses informations sur la mythologie : elles montrent que les mythes migrent en même temps que les hommes, et que l'étude des premiers renseigne sur les migrations des seconds ; par ailleurs, les mythes semblent surtout évoluer par ponctuations ; enfin, il devient possible de reconstituer des récits paléolithiques.

Quand ils racontaient l'histoire de Callisto ou celle de Polyphème, les aèdes grecs émouvaient leur auditoire. Avaient-ils conscience de prolonger une tradition plurimillénaire ? Sans doute pas. Mais la mythologie a une permanence historique qui en fait la gardienne de notre histoire. De nombreuses explications en ont été proposées. On peut imaginer que la mythologie donnait au moins deux avantages adaptatifs à une société ancienne.

Tout d'abord, les groupes qui survivaient et se reproduisaient bien étaient ceux qui transmettaient le mieux l'expérience de vie des anciens, dont les mythes sont l'un des véhicules. Ensuite, on peut noter qu'avec la conscience de soi est venue l'angoisse existentielle, que les mythes ont contribué à canaliser en mettant de l'ordre dans le monde, grâce à la cosmogonie qu'ils véhiculent. Mais peut-être les mythes trouvent-ils une origine plus simple dans le fait que l'homme ne peut percevoir le monde sans ressentir aussitôt le besoin de le comprendre. Les mythes seraient alors l'une des plus anciennes manifestations de cette pulsion. ■

Neil Ribe, Mehdi Habibi et Daniel Bonn

Is s'enroulent, oscillent, se plient, serpentent...
Soumis à la gravité, les filets de miel, d'huile ou d'autres
fluides visqueux ont des comportements étonnants
et qui restent imparfaitement compris.

Les acrobaties

Si vous aimez le miel sur votre tartine au petit-déjeuner, vous êtes prêt à réaliser l'une des expériences de physique des fluides les plus simples et les plus belles. Plongez une cuillère dans le pot de miel, sortez-la et tenez-la verticalement, quelques centimètres au-dessus de la tranche de pain. Le filet de miel qui s'en écoule ne rejoint pas la tartine en ligne droite, mais forme, dans le bas, une structure hélicoïdale. À la fin des années 1950, cette ressemblance avec un tas de cordage enroulé a conduit les Américains George Barnes et Richard Woodcock, les premiers chercheurs à examiner le phénomène, à parler d'« enroulement d'une corde liquide ».

Nous sommes tous trois fascinés depuis longtemps par cet effet, mais nous n'avions jamais trouvé l'occasion de l'étudier jusqu'à il y a une dizaine d'années, quand N. Ribe et D. Bonn ont découvert par hasard leur intérêt commun lors d'un atelier scientifique à Paris. À l'époque, D. Bonn collaborait avec l'Institut d'études avancées en sciences fondamentales de Zanjan, en Iran, et nous

L'ESSENTIEL

En tombant sur un plan,

les fluides visqueux tels que le miel s'enroulent en hélice. Ce phénomène, dont l'étude systématique est récente, présente une complexité inattendue.

Un fluide très visqueux

manifeste quatre modes distincts d'enroulement, selon le bilan des forces de gravité, de viscosité et d'inertie qui s'exercent sur le filament liquide.

Plusieurs phénomènes,

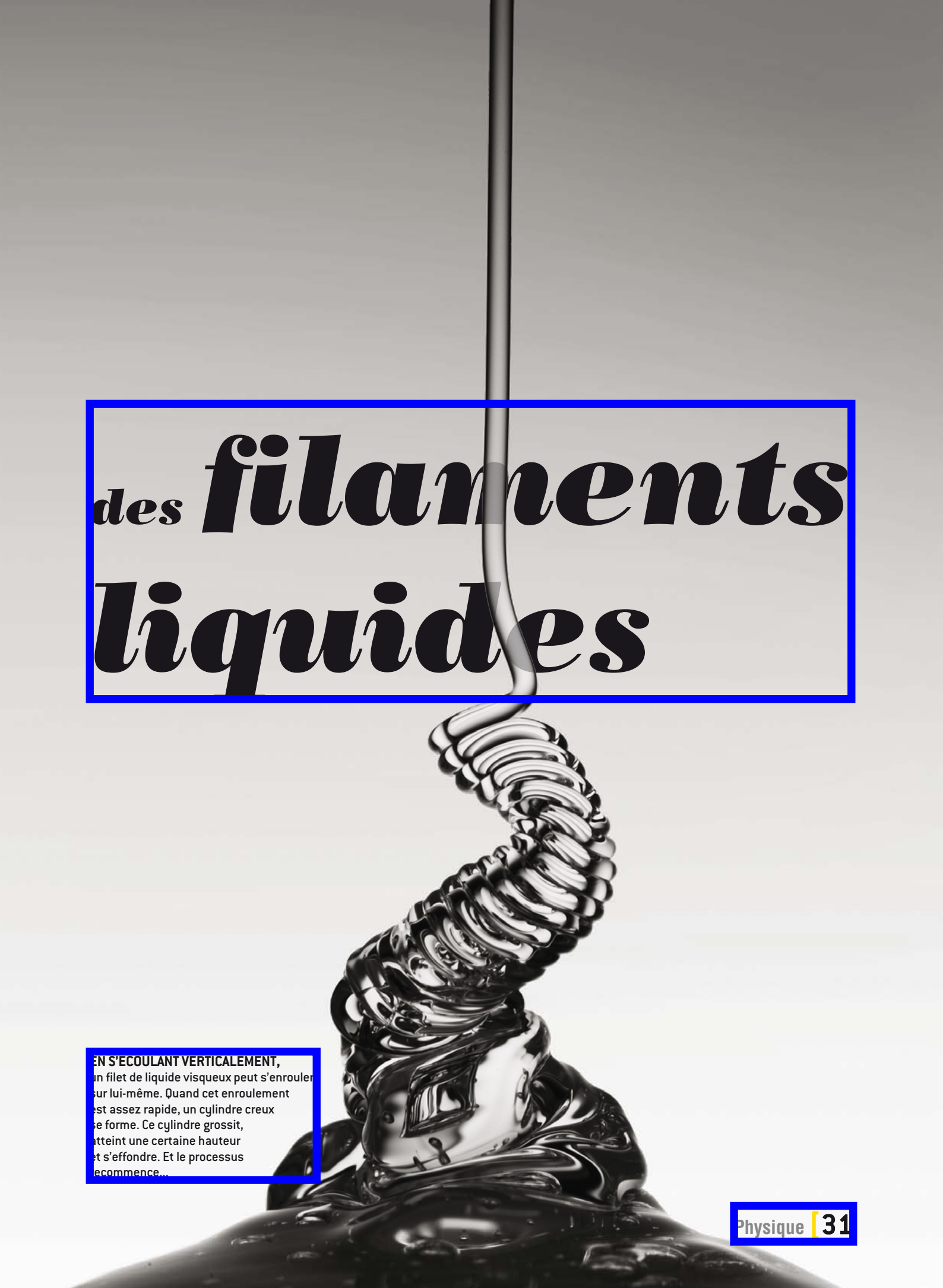
tel celui de la formation de bulles en spirales, restent à expliquer de façon complète.

avons donc invité M. Habibi et quelques autres chercheurs qui y travaillaient (dont, à divers moments, Ramin Golestanian, Maniya Maleki, Yasser Rahmani et Seyed Hossein Hosseini) à compléter l'équipe.

L'expérience de la tartine en version contrôlée

Nous avons ainsi développé une version contrôlée de l'expérience du petit-déjeuner, en remplaçant le miel par des huiles de silicone, car ces dernières sont disponibles avec un large éventail de viscosités. La viscosité est une mesure de l'« épaisseur » d'un liquide, de sa résistance à l'écoulement due aux frottements internes. Nous avons fait varier les conditions d'écoulement (tels le débit du fluide et la hauteur de laquelle il tombe) et examiné comment elles modifient la fréquence d'enroulement à la vitesse à laquelle la colonne verticale de fluide s'enroule).

Au début, nous nous attendions à ce que l'enroulement soit une affaire de tout



des filaments liquides

EN S'ÉCOULANT VERTICALEMENT, un filet de liquide visqueux peut s'enrouler sur lui-même. Quand cet enroulement est assez rapide, un cylindre creux se forme. Ce cylindre grossit, atteint une certaine hauteur et s'effondre. Et le processus recommence...

ou rien, c'est-à-dire à ce qu'il ait lieu ou non, selon les conditions expérimentales. Nous n'étions donc pas du tout préparés à la profusion de comportements différents que nous avons observés.

Par exemple, pour un faible débit, nous avons constaté que plus la hauteur de chute du fluide est grande, plus il s'enroule lentement. Mais pour des débits plus importants, c'est le contraire : quand la hauteur de chute augmente, la fréquence aussi augmente rapidement. De plus, quand on maintient constante la hauteur de chute, le liquide s'enroule en passant, de façon apparemment aléatoire, d'un état à l'autre, les deux états correspondant à des fréquences différentes.

Trois principales forces à l'œuvre

Parallèlement à ces expériences, nous avons élaboré un modèle mathématique afin d'identifier les principes de base à l'œuvre dans l'enroulement d'une corde liquide. Le point de départ était les lois du mouvement de Newton, écrites sous une forme appropriée pour un mince filet liquide beaucoup plus long que son diamètre.

Trois principales forces agissent sur chaque élément de volume d'une telle

LES AUTEURS



Neil RIBE
est directeur de recherche au CNRS au laboratoire FAST Fluides

automatique et systèmes thermiques) à l'Université Paris-Sud, à Orsay.



Mehdi HABIBI
est chercheur invité à l'Institut de physique de l'Université d'Amsterdam

est aussi professeur à l'Institut d'études avancées en sciences fondamentales à Zanjan, en Iran.



Daniel BUNN
dirige l'Institut de physique de l'Université d'Amsterdam. Ses travaux

sur les enroulements liquides ont été en partie réalisés alors qu'il était chercheur du CNRS à l'École normale supérieure, à Paris.

corde liquide. Il y a d'abord la gravité, qui s'exerce vers le bas, et les forces visqueuses (forces de frottement interne). La corde peut se déformer de trois façons : elle peut s'étirer, se courber ou se tordre. À chacun de ces modes de déformation est associée une force visqueuse qui s'y oppose.

La forme de la corde dépend des intensités relatives de ces forces ainsi que de la force d'inertie du fluide (c'est-à-dire le produit de la masse de l'élément fluide par son accélération). La tension de surface, force importante dans de nombreux autres écoulements fluides, s'est révélée ne jouer ici qu'un rôle mineur.

La résolution des équations était un défi. Dans la plupart des problèmes de physique figurant dans les manuels universitaires, les frontières du système sont spécifiées, et la tâche de l'étudiant est de déterminer ce qui se passe à l'intérieur. En revanche, l'enroulement d'une corde liquide est ce que les physiciens nomment un « problème aux frontières libres », où la forme de la frontière est inconnue et fait elle-même partie du problème à résoudre. Avec beaucoup de précaution, nous avons réussi à montrer que l'enroulement d'un fluide très visqueux peut avoir lieu selon quatre modes distincts, chacun caractérisé

Enroulements et balancements

Les filaments de fluide visqueux peuvent s'enrouler de quatre façons différentes selon les intensités relatives des forces de gravité, d'inertie et de viscosité (forces de frottement). Dans les exemples illustrés ci-contre, les auteurs ont laissé couler un filet d'huile de silicone sur une plaque métallique de hauteur variable. Le filet avait un diamètre de 0,7 millimètre et s'écoulait avec un débit de 0,23 millilitre par minute. Les huiles présentant une viscosité telle que celle utilisée ici (100 000 centistokes) mettent quelques minutes à s'écouler entièrement de la cuillère. Pour comparaison, l'eau à température ambiante a une viscosité de 1 centistoke : la viscosité du miel est, elle, de 10 000 centistokes.

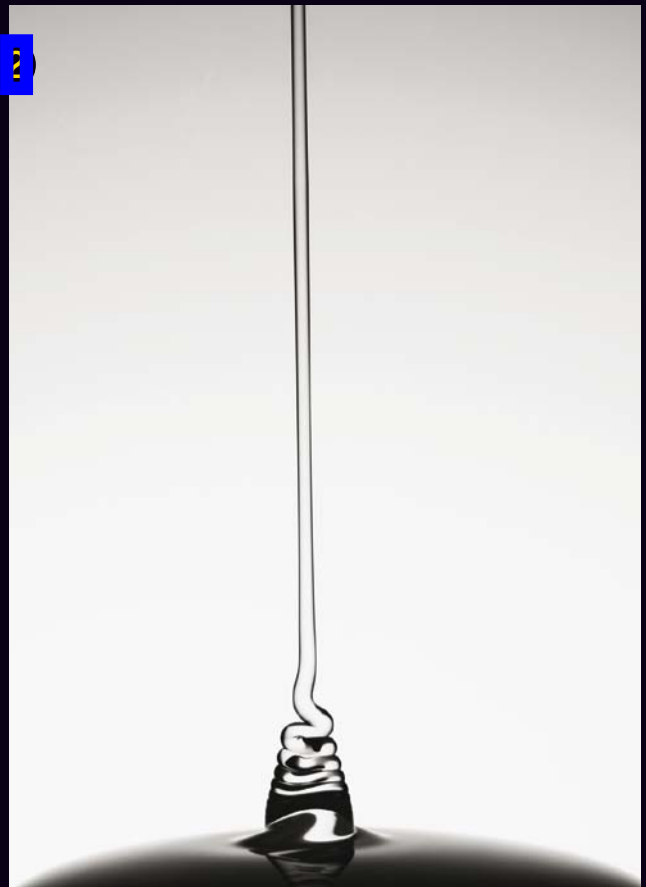
1 Mode visqueux. Lorsque le filet d'huile tombe d'une faible hauteur (4 à 8 millimètres), il se comporte comme du dentifrice qu'on fait sortir lentement du tube en le pressant. Le fluide s'enroule si lentement que la gravité et l'inertie sont négligeables par rapport aux forces de frottement. La force visqueuse dominante est celle qui s'oppose à la flexion.

2 Mode gravitationnel. Pour des hauteurs de chute comprises entre 1,5 et 7 centimètres, la gravité devient un facteur important. La corde liquide présente deux parties, une longue queue au-dessus et un enroulement plus court en dessous. Dans la queue, la gravité équilibre la résistance visqueuse à l'étirement, alors que dans l'enroulement elle équilibre la résistance visqueuse à la flexion.

3 Mode pendulaire. Pour des hauteurs comprises entre 7 et 12 centimètres, la queue se balance d'avant en arrière à la manière d'un pendule. Pour la plupart des hauteurs, la queue ne peut pas se balancer librement, car son mouvement est régi par l'enroulement dans le bas. Mais pour certaines hauteurs d'écoulement, la fréquence d'enroulement correspond à l'une des fréquences naturelles d'oscillation de la queue (un effet de résonance, par lequel la situation s'auto-renforce). La queue tournoie alors en décrivant un large cercle.

4 Mode inertiel. Au-delà de 15 centimètres de chute, la queue est quasiment verticale, parce que l'enroulement n'exerce plus sur elle d'attraction latérale significative. Au sein de l'enroulement, la force visqueuse qui résiste à la flexion est presque entièrement équilibrée par l'inertie. La gravité ne jouant plus qu'un rôle mineur.





Au-delà du simple enroulement

Les liquides très fluides, contrairement aux liquides visqueux, peuvent faire beaucoup plus que juste s'enrouler. Dans ces exemples, les auteurs ont utilisé des huiles de viscosité comprise entre 400 et 6 000 centistokes : des liquides plus coulants que le miel, mais plus épais que l'eau.

➤ **Ecoulement stationnaire.** Pour une viscosité relativement faible, de petites hauteurs de chute et des débits élevés, le fluide tombe tout droit et s'étale de façon égale dans toutes les directions de la plaque. Ces conditions s'appliquent à des liquides ménagers courants tels que l'eau ou l'huile d'olive. Cela dit, même ces liquides peuvent s'enrouler si les conditions sont réunies. Ainsi, de l'huile d'olive versée d'une hauteur de 10 centimètres à un débit de 1 millilitre par 40 minutes s'enroulerait.

➤ **Pliage rotatif.** La corde liquide se replie périodiquement sur elle-même tandis que l'ensemble du motif de pliage tourne autour d'un axe vertical, créant un effet de torsion.

➤ **Surenroulement.** Le surenroulement désigne ce qui se passe avec des cordons téléphoniques entortillés, c'est-à-dire subissant un enroulement secondaire qui se superpose à la structure déjà bien enroulée. Dans le cas des fluides, le filament qui s'écoule crée un cylindre creux, qui à son tour s'enroule dans son ensemble. L'enroulement secondaire se fait à un rythme environ dix fois plus lent que l'enroulement primaire.





Des spirales de bulles

Les auteurs ont découvert ce motif par hasard en expérimentant avec une huile de silicone de haute viscosité (30 000 centistokes), à un débit élevé (0,14 millilitre par seconde) et à de faibles hauteurs de chute (3 à 4 centimètres). Les spirales ont toujours cinq branches. Elles naissent parce que le centre de l'enroulement n'est pas fixe, mais décrit un cercle. Aux points de croisement entre les boucles successives du filament liquide qui s'enroule, les bulles d'air sont facilement piégées. La position des points de piégeage migre lentement autour d'un cercle tandis que les bulles précédentes sont entraînées radialement par le fluide qui s'étale. Les spirales résultent de la combinaison de ces deux mouvements.

par un bilan de forces différent (voir l'encadré page 32).

Ayant déterminé les grands types d'enroulements, nous pensions avoir brossé un tableau assez complet – à tort. Des expériences complémentaires, menées à titre exploratoire et sans idées préconçues, ont révélé des phénomènes nouveaux et remarquables.

Le premier est l'apparition de magnifiques ondes spirales de bulles d'air dans une mince couche de fluide qui s'écarte du filament en train de s'enrouler (voir la photographie ci-dessus). Elles se forment quand les boucles successives du filament sont légèrement décalées l'une par rapport à l'autre, piégeant de petites poches d'air. Mais nous ne comprenons toujours pas ce qui confère à ces spirales leur forme précise, ni pourquoi elles ne se créent que dans une plage étroite de valeurs de la viscosité, du débit et de la hauteur de chute du fluide.

Nous avons également joué avec des huiles de silicone de viscosité beaucoup plus faible. Ces fluides s'enroulent beau-

SUR LE WEB

Instructions pour réaliser vos propres expériences et des liens vers des vidéos d'enroulements de cordes liquides : ScientificAmerican.com/feb2014/coils

BIBLIOGRAPHIE

A. Javadi et al., Delayed capillary breakup of falling viscous jets, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, 144501, 2013.

N. M. Ribe, M. Habibi et U. Bonn, Liquid rope coiling, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, pp. 249-266, 2012.

P.-Th. Brun, Dynamique des filaments élastiques et visqueux, thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 17 septembre 2012.

A. Herczynski et al., Painting with drops, jets, and sheets, *Physics Today*, vol. 64, pp. 31-36, juin 2011.

coup plus rapidement (jusqu'à 2 000 fois par seconde) et il nous a donc fallu des caméras rapides pour enregistrer leur comportement. Les fluides peuvent s'enrouler et même se plier de façons bien plus complexes (voir l'encadré page 34). Un état donné persiste longtemps en l'absence de perturbation, mais bascule soudainement dans un autre si l'on donne au dispositif un petit coup bien sec.

Dans toutes les expériences décrites ci-dessus, le fil de liquide tombait sur une surface immobile. Mais d'autres effets peuvent apparaître si la surface et la source de liquide sont en mouvement relatif, comme on pu l'observer l'artiste américain Jackson Pollock avec ses tableaux d'action painting ou les fabricants de textiles avec des fils de polymère fondu.

Couler sur un tapis

roulant

En 2006, à l'Université de Cambridge en Grande Bretagne, nos collègues Keith Moffat, Sunny Chiu-Webster et John Lister ont étudié ces situations en utilisant une sorte de « machine à coudre du fluide ». Ce dispositif extrude un filament de fluide risqué sur un tapis qui roule horizontalement à vitesse constante. À grande vitesse, le fil tiré laisse une trace rectiligne sur le tapis. Mais quand le tapis avance plus lentement, des motifs irréguliers plus complexes émergent : des méandres, des boucles qui alternent, des doubles enroulements et même une forme en W.

Nous avons encore beaucoup de chemin à faire avant de comprendre parfaitement les cordes liquides. L'une des grandes priorités est de comprendre le mécanisme qui engendre les ondes spirales de bulles. Pourquoi le centre de l'enroulement se met-il à décrire une trajectoire distincte ? Un autre objectif est de modéliser l'enroulement secondaire complexe qui se produit dans les fluides de faible viscosité.

Nous projetons aussi d'étendre notre exploration à des systèmes plus exotiques, notamment des fluides complexes qui réagissent de façon inhabituelle aux forces appliquées, ainsi que des fluides électriquement chargés qui s'enroulent à des échelles micrométrique ou nanométrique dans un champ électrique. À en juger par nos expériences passées, bien d'autres surprises nous attendent.

Mieux traiter le glaucome

Christophe Baudouin, Alexandre Denouer et William Rostène

Les traitements actuels de cette maladie de l'œil ont leurs limites. Mais de nouvelles pistes se dessinent pour les améliorer et pour en proposer d'autres, qui agiraient à un stade plus précoce.

L'ESSENTIEL

Deuxième cause

de cécité dans le monde, le glaucome est une destruction progressive du nerf optique liée à une surpression oculaire.

Les traitements visant

à réduire la pression oculaire sont la première ligne thérapeutique, avant les lasers et la chirurgie.

Mais leur administration

au long cours peut endommager la surface oculaire, notamment à cause des conservateurs.

De nouvelles approches

offrent des pistes pour éliminer les conservateurs ou pour cibler les causes de la surpression oculaire.

Le glaucome est l'une des maladies graves de l'œil les plus fréquentes. Deuxième cause de cécité dans le monde après la cataracte, il touche 50 à 60 millions de personnes, dont 6 à 7 millions sont aveugles. On estime qu'environ 800 000 personnes sont traitées en France pour un glaucome, mais que 400 000 à 600 000 autres présentent cette maladie sans le savoir.

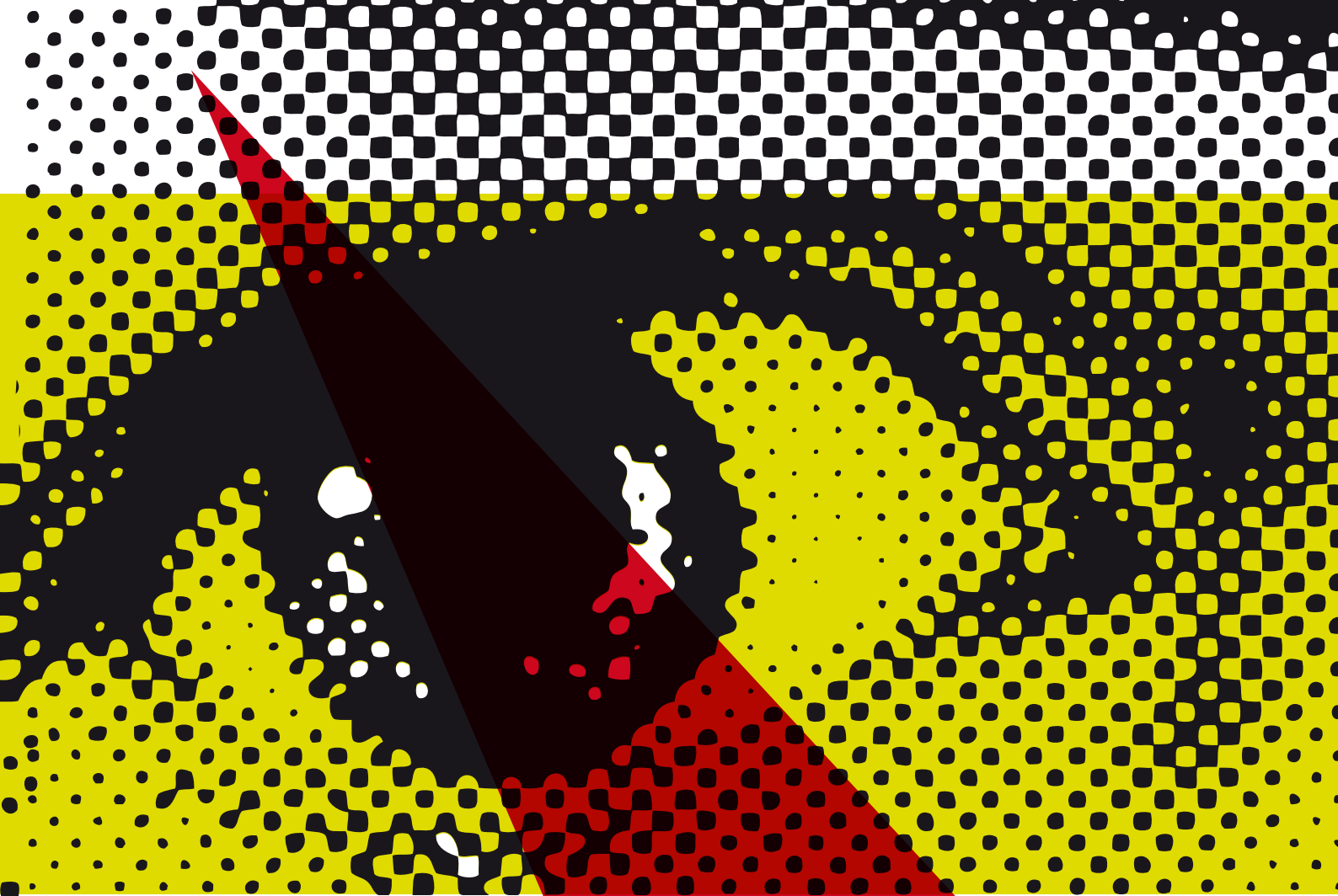
Le glaucome est en effet une pathologie sournoise que l'on ne ressent en général pas : il est souvent indolore et atteint la vision de façon progressive, en commençant par les côtés. Ce n'est que dans les formes tardives, très avancées, que l'on se rend compte d'un déficit visuel menaçant. En revanche, la perte de vision est définitive : lorsque la vision centrale est atteinte, le handicap visuel est majeur et irréversible. Ainsi, seul un dépistage systématique passé la quarantaine permet le diagnostic et, donc, une réponse thérapeutique précoce et adaptée.

Le glaucome est une neuropathie optique, c'est-à-dire une maladie qui détruit le nerf optique. Dans la plupart des cas, cette

destruction est causée par une surpression oculaire chronique. Aujourd'hui, les traitements médicamenteux – qui constituent la première thérapie, avant le laser et la chirurgie – se bornent à réduire la pression oculaire afin d'éviter la neuropathie optique ou d'empêcher sa progression vers la cécité. Mais ces traitements – des gouttes instillées dans l'œil – ont leurs limites, car, utilisés sur le long terme, ils peuvent endommager la surface oculaire.

Depuis quelques années, l'amélioration de ces traitements est ainsi devenue un enjeu scientifique et pharmacologique de premier plan. Parallèlement, une meilleure compréhension des mécanismes en jeu dans la survenue du glaucome ouvre de nouvelles perspectives pour traiter de façon précoce la pathologie, voire pour la faire régresser. Du dépistage, toujours plus précis, aux nouvelles pistes de traitement, voici les dernières avancées thérapeutiques dans la prise en charge de cette maladie.

Il existe deux grandes familles de glaucomes selon l'anatomie de l'œil, et plus particulièrement de l'angle iridocornéen – la structure formée par la cornée



et l'iris (voir l'encadré page 38). C'est par l'angle iridocornéen qu'est évacuée l'humeur aqueuse, le liquide qui remplit les chambres antérieure (entre la cornée et l'iris) et postérieure (entre l'iris et le cristallin) de l'œil. L'humeur aqueuse est le principal régulateur de la pression oculaire: tant qu'elle circule librement à travers l'angle iridocornéen, la pression est équilibrée. Mais dès que la circulation est bloquée, la pression intra-oculaire augmente. Les deux familles de glaucomes sont définies par le type de mécanisme qui bloque la circulation de l'humeur aqueuse.

Une mauvaise circulation du liquide oculaire

En temps normal, le liquide situé dans la chambre antérieure de l'œil est évacué par le fond de l'angle iridocornéen, constitué d'un tissu perméable (des fibres enchevêtrées), le trabéculum, qui sert de filtre. Lorsque la structure anatomique de l'œil est normale, mais que le trabéculum est altéré, en général pour des raisons d'origine génétique, donc familiale, le glaucome est dit à

angle ouvert. Le filtre retient les liquides de l'œil, la pression monte. Le glaucome est la conséquence de cette hypertonie oculaire: la surpression se répartissant dans l'ensemble de la sphère oculaire, elle retient sur la structure la plus sensible à une pression excessive, le nerf optique.

Le nerf optique est constitué des prolongements – les axones – des neurones de la rétine qui reçoivent l'information visuelle. Les formes et les couleurs sont captées à la surface de la rétine par des cellules photoréceptrices qui livrent l'information aux neurones de la rétine *via* plusieurs intermédiaires cellulaires). Les neurones rétiniens transmettent l'information visuelle au cerveau *via* les axones qui constituent le nerf optique. L'hypertonie entraîne la destruction progressive de ces neurones, et donc du nerf optique. Cette destruction définit le glaucome.

La plupart des glaucomes à angle ouvert sont ainsi dus à une hypertonie oculaire, même s'il existe des exceptions: certains glaucomes à composante neurologique ou vasculaire, dits à pression normale, peuvent entraîner des dégâts similaires.

L'autre famille de glaucomes, dits par fermeture de l'angle, rassemble les glaucomes liés à une structure anatomique anormale de l'angle iridocornéen. Lorsque l'angle est trop serré, l'accès de l'humeur aqueuse au trabéculum peut être difficile, voire bloqué. Les globes oculaires de petit diamètre, l'hypermétropie ou certaines particularités anatomiques de l'iris favorisent cette affection. En outre, ce phénomène est particulièrement marqué la nuit, lorsque la pupille se dilate dans l'obscurité: l'iris avance et peut entrer en contact avec la cornée, bloquant ainsi l'accès des liquides oculaires au trabéculum. L'humeur aqueuse ne peut plus sortir, la pression monte, ce qui entraîne de même une destruction du nerf optique.

Les glaucomes par fermeture de l'angle peuvent se manifester brutalement par de grandes crises nocturnes, douloureuses, spectaculaires, très destructrices, nécessitant un traitement en urgence, ou par des crises moins violentes, entraînant peu ou pas de douleur, qui détruisent le nerf optique sans que l'on s'en aperçoive, de façon rapide et irréversible. Ces glaucomes

sont particulièrement agressifs et, s'ils ne sont pas détectés à temps, sont sources de cécité ou de malvoyance définitive alors que leur traitement préventif ou curatif est relativement simple.

Dans le monde, les deux types de glaucomes s'équilibrent en fréquence. En France et dans les pays occidentaux, le glaucome à angle ouvert est plus fréquent que le glaucome par fermeture de l'angle, mais tous deux constituent des enjeux importants de l'ophtalmologie en termes de dépistage, d'exploration et de traitement.

Dépister et surveiller le glaucome

La plupart des glaucomes sont dépistés par des ophtalmologistes au cours d'un examen oculaire de routine. La mesure de la pression oculaire est systématique chez le spécialiste. Associée à l'examen du nerf optique, voire à des explorations

plus élaborées, cette mesure permet de dépister l'existence d'un glaucome, d'évaluer les mécanismes et de mesurer sa gravité. Le caractère familial du glaucome à angle ouvert peut aussi faire découvrir cette maladie chez des enfants ou des parents de patients glaucomateux. Cette information est essentielle, car lorsque le glaucome est détecté tôt, le traitement est efficace : il empêche que le handicap visuel ne se développe.

Quatre principaux paramètres interviennent dans le diagnostic et l'évaluation du glaucome : la pression oculaire, l'angle iridocornéen, l'aspect du nerf optique et le champ visuel.

Actuellement mesurée à l'aide de tonomètres entrant en contact avec l'œil ou de systèmes sans contact à air pulsé, la pression oculaire sera bientôt enregistrée par des capteurs sur 24 heures.

L'angle iridocornéen peut être évalué à l'aide de techniques d'imagerie particulière-

ment performantes, la tomographie par cohérence optique et la biomicroscopie ultrasonique de haute résolution. Fondées sur la mesure de la réflexion de faisceaux laser dans le proche infrarouge ou d'ultrasons sur les parois, ces techniques permettent de visualiser les structures micrométriques à l'intérieur des tissus biologiques et de suivre leur évolution en fonction de la lumière et de l'obscurité (voir les figures 1a et 1b).

L'aspect du nerf optique est visible par un fond d'œil (voir la figure 1d). Son analyse par microscopie à balayage laser (imagerie confocale) permet en outre de mesurer précisément la perte des fibres nerveuses du nerf optique.

Enfin, l'examen du champ visuel mesure le retentissement du glaucome sur la vision, en particulier périphérique, qui est longtemps la seule touchée.

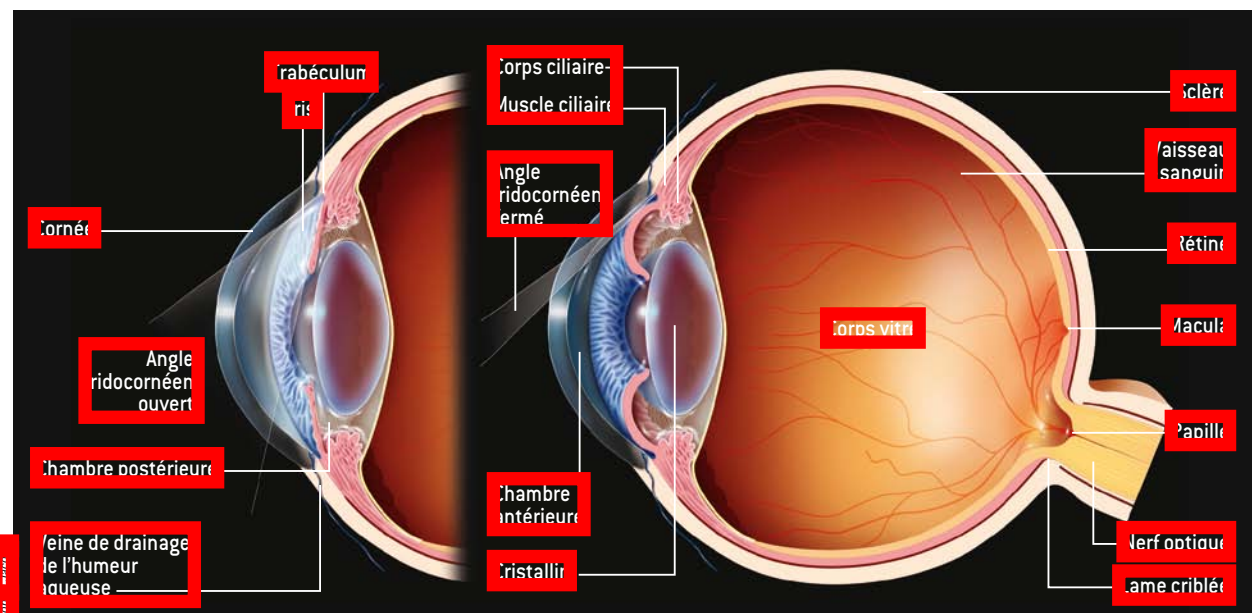
Tous ces systèmes bénéficient de techniques automatisées permettant un diagnostic précis et un suivi rigoureux. La maladie

L'ANATOMIE DE L'ŒIL GLAUCOMATEUX

On distingue deux types de glaucome, en fonction de l'anatomie de l'œil. Le glaucome à angle ouvert (à gauche) n'est pas causé par une anomalie anatomique. L'angle formé par la cornée et l'iris – l'angle iridocornéen – est normal. En revanche, le filtre qui constitue le fond de cet angle, le trabéculum, est altéré, en général pour des raisons d'origine génétique. Dans un œil sain, l'humeur aqueuse, le liquide qui remplit les chambres antérieure et postérieure de l'œil, est évacuée à travers le trabéculum, ce qui équilibre la pression intra-oculaire. Dans un glaucome à angle ouvert, le trabéculum retient l'humeur aqueuse, ce qui fait mon-

ter la pression intra-oculaire. La surpression détruit peu à peu les neurones qui partent de la rétine et constituent le nerf optique. Il en résulte une diminution progressive du champ de vision, de la périphérie au centre.

Le glaucome par fermeture d'angle (à droite) est quant à lui dû à une anomalie anatomique. L'angle iridocornéen est anormalement serré, ce qui bloque l'accès de l'humeur aqueuse au trabéculum. L'effet est d'autant plus prononcé qu'il fait sombre, car lorsque la pupille se dilate, l'iris avance et peut entrer en contact avec la cornée (l'accès est bloqué).



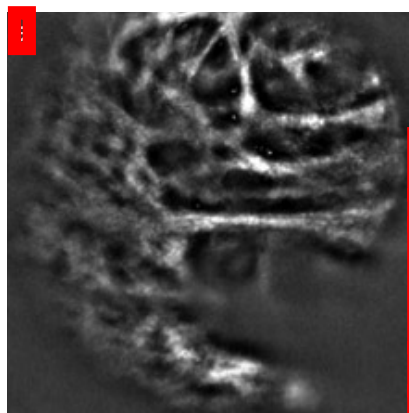
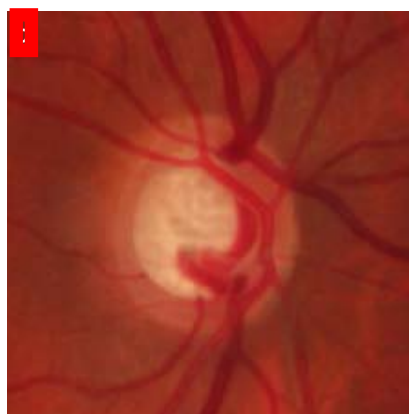
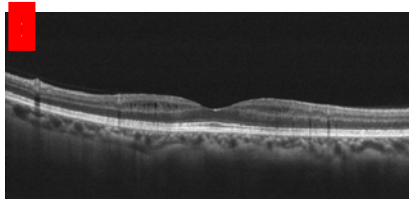
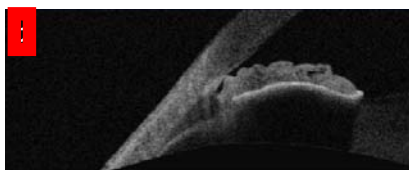
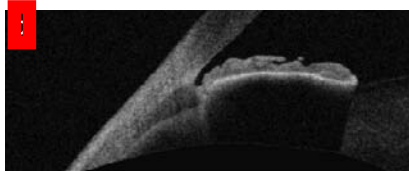
étant irréversible, il s'agit de vérifier que le traitement administré stabilise les lésions du nerf optique et que la vue ne baisse plus. Depuis peu utilisées pour analyser le nerf optique, les techniques de tomographie par cohérence optique fournissent des analyses ultrarapides de l'épaisseur des différentes couches de cellules de la rétine, en particulier de l'ensemble des fibres nerveuses à l'endroit où elles convergent pour former le nerf optique (la papille) et de la population de neurones qui entoure la macula, la zone de la rétine située dans l'axe de la pupille. L'amincissement, puis l'atrophie de ces couches sont des signes du glaucome (voir la figure 1c).

Ces techniques sont particulièrement intéressantes dans les formes précoces, car la destruction des fibres nerveuses précède la perte fonctionnelle détectée par l'évaluation du champ visuel. Les développements actuels se portent vers l'étude par optique adaptative de deux zones précises, la papille et la lame criblée, l'endroit où les fibres nerveuses traversent la membrane qui enveloppe l'œil, la sclère.

Empruntée à l'astronomie, cette technique d'imagerie permet de corriger en temps réel les aberrations optiques liées à l'inhomogénéité intra-oculaire, à l'aide d'un miroir déformable placé en amont de la détection d'images (la forme du miroir est ajustée en permanence grâce aux informations transmises par un analyseur de surface). L'optique adaptative offre la possibilité de visualiser avec une précision inégalée les pores de la lame criblée et leurs modifications dans le glaucome (voir la figure 1e). Certaines modifications, telles que des altérations de leur orientation ou de leur forme, ou une fusion de certains pores, seraient des signes précoces d'atteinte, voire des facteurs de risque.

Des traitements de plus en plus efficaces

Le glaucome par fermeture de l'angle repose sur des mouvements de l'iris d'arrière en avant en fonction de la luminosité. Lorsque ce mécanisme a été identifié, il peut être bloqué en pratiquant, à l'aide d'un laser, un microtrou dans la paroi de l'iris (iridotomie) ou une contraction de la périphérie de l'iris pour l'aplatir et l'empêcher d'entrer en contact avec la cornée (iridoplastie). Ces traitements sont souvent très efficaces. En cas d'échec, ils peuvent être complétés



PLUSIEURS PARAMÈTRES aident à diagnostiquer le glaucome. La mesure de l'angle irido-cornéen en tomographie par cohérence optique permet d'évaluer son ouverture à la lumière (a) et sa fermeture à l'obscurité (b). La détection de microkystes dans les couches cellulaires de la rétine, observées par la même technique, est un signe d'un glaucome (c), de même qu'une papille optique excavée (creusée en son centre) en fond de l'œil (d, tache blanche) ou une altération des pores de la lame criblée, observée par optique adaptative (e).

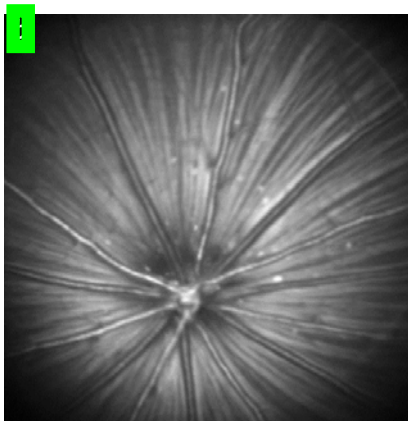
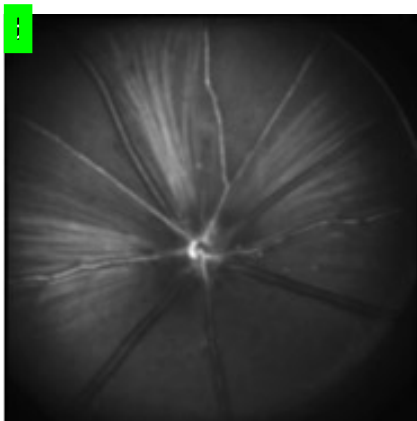
par l'ablation chirurgicale d'une partie du trabéculum (trabéculotomie).

En revanche, le glaucome chronique à angle ouvert relève le plus souvent d'un traitement médical. La pression est modérément élevée et un arsenal thérapeutique de plus en plus riche a été développé pour la faire baisser à un niveau de sécurité, qui permet de ralentir ou de bloquer l'atteinte du nerf optique.

Pendant près d'un siècle, rares étaient les molécules connues abaissant la pression oculaire. L'efficacité des traitements était moyenne et leur tolérance, médiocre. Jusqu'au milieu des années 1990, la pilocarpine et les dérivés de l'adrénaline, qui améliorent l'élimination de l'humeur aqueuse, ou les bêtabloquants, qui en diminuent la synthèse, étaient les seuls traitements médicaux du glaucome à angle ouvert. Lorsqu'ils n'étaient pas suffisants ou trop mal tolérés, le recours à la chirurgie devenait inévitable. La chirurgie consiste à libérer, sous anesthésie locale, le filtre constitué par le trabéculum, en y créant une ouverture par laquelle l'humeur aqueuse s'évacuera, ou en nettoyant les couches anormales de ce filtre (sclérectomie profonde non perforante). Cette microchirurgie permet d'augmenter la perméabilité du filtre, ce qui réduit la pression oculaire et, par conséquent, son impact négatif sur le nerf optique.

Ces techniques sont toujours très utilisées. Mais, depuis une quinzaine d'années, sont apparues nombre de nouvelles molécules qui ont augmenté l'efficacité du traitement médical du glaucome. En particulier, les prostaglandines, par leur efficacité et leur très bonne tolérance globale, sont devenues, quelques années après l'arrivée de la première prostaglandine oculaire en 1996, la principale famille de molécules prescrites pour traiter le glaucome. Cette nouvelle classe thérapeutique permet d'ouvrir une voie parallèle de « dérivation » de l'humeur aqueuse (la voie uvéosclérale), qui entraîne de façon mécanique une diminution de la pression intra-oculaire globale.

Les bêtabloquants sont aussi très utilisés, seuls ou en association avec une autre molécule, en particulier une prostaglandine, leurs actions pharmacologiques étant complémentaires. Au début des années 2000 en effet, un concept nouveau, les associations dites fixes, a permis de mêler deux molécules actives dans le même collyre (en général une prostaglandine et un bêtabloquant) sans que leur activité n'en soit



2. UN RAT ATTEINT D'UN GLAUCOME perd des neurones de la rétine, comme chez l'homme. Observés au microscope, ils ne sont plus que quelques-uns à se rejoindre pour former le nerf optique (a). En revanche, un réseau normal est maintenu (b) lorsque le rat est traité au moyen d'une molécule étudiée par les auteurs (un antagoniste du récepteur CXCR3).

perturbée. Ces associations facilitent la vie des patients en diminuant le nombre d'instillations quotidiennes. Surtout, elles améliorent la tolérance locale, car les gouttes, en contrepartie de leur efficacité, restent irritantes pour les yeux qui les reçoivent pendant des dizaines d'années.

De fait, l'enjeu de la tolérance est devenu, après celui de l'efficacité, la principale cible de l'industrie pharmaceutique et des spécialistes du glaucome. En particulier, la découverte que le conservateur des collyres lui-même crée des irritations parfois difficilement supportables (sécheresse oculaire, réactions allergiques, inflammation des paupières, larmolement...) a conduit à une prise de conscience : un traitement mal toléré sera soit non pris, avec des oublis volontaires ou non, soit peu efficace sur des yeux devenant de plus en plus fragilisés. En d'autres termes, un œil *maltraité* devient à la longue un œil *mal traité*.

Ne pas conserver... les conservateurs

La réglementation exige que tout flacon de collyre contienne un conservateur pour éviter, ou plutôt retarder, la contamination de la solution après son ouverture. Ces conservateurs doivent tuer les germes susceptibles de devenir pathogènes lors d'une éventuelle introduction à la surface de l'œil, mais sans altérer les tissus oculaires – une gageure que l'industrie pharmaceutique tente de résoudre depuis les décennies.

Nombre de médicaments à action locale, efficaces et en général bien tolérés, ont ainsi été mis à la disposition des

LES AUTEURS

Christophe BAUDOUIN, professeur et chef de service au Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, est directeur de l'équipe Chimioquinas et glaucome, à l'Institut de la vision, à Paris.

Alexandre DENOYER, docteur en médecine et ès sciences, est ophtalmologiste au Centre hospitalier des Quinze-Vingts et chercheur Inserm à l'Institut de la vision.

William ROSTÈNE est directeur de recherche émérite Inserm à l'Institut de la vision.

BIBLIOGRAPHIE

J. Brignole-Baudouin *et al.*, A new safety concern for glaucoma treatment demonstrated by mass spectrometry imaging of benzalkonium chloride distribution in the eye, *PLoS One*, vol. 7, e50180, 2012

A. Denoyer *et al.*, CXCR3 antagonism of SDF-1(5-67) restores trabecular function and prevents retinal neurodegeneration in a rat model of ocular hypertension, *PLoS One*, vol. 7, e37873, 2012

W. Rostène *et al.*, Neurochemokines : a menage a trois providing new insights on the functions of chemokines in the central nervous system, *J. Neurochem.*, vol. 118, pp. 680-694, 2011.

ophtalmologistes, médicaments où peu à peu disparaissaient les produits les plus toxiques ou allergisants, tels le mercure ou la chlorhexidine. Aussi, à première vue, à l'exception de quelques cas d'allergie aiguë survenant dans les heures ou les jours suivant l'instauration d'un traitement, la plupart des médicaments de l'ophtalmologie moderne semblent bien tolérés, même en utilisation prolongée.

Pourtant, une évaluation plus fine montre que la surface oculaire et, par là même, le confort des patients, sont souvent beaucoup plus touchés qu'il n'y paraît par ces traitements locaux. Dans une étude réalisée en 2002, Wolfgang Bernauer, de l'Université de Zurich, estime que 24 pour cent des maladies de la surface oculaire sont dues à un traitement local. Outre les simples problèmes de confort, des anomalies graves peuvent se développer à bas bruit et ne se manifester que tardivement, parfois de façon inattendue.

Le chlorure de benzalkonium : plus toxique qu'il n'y paraît

Au laboratoire, nous avons montré que le chlorure de benzalkonium, devenu le principal conservateur des collyres modernes en raison du taux assez faible d'allergies à court terme associées, perturbe l'œil en surface et en profondeur. Dans les collyres, sa concentration varie entre 0,004 et 0,02 pour cent. À de telles concentrations, cette molécule pouvait être toxique non seulement pour les germes contre lesquels il doit lutter, mais aussi pour la surface oculaire, car il déstabilise le film lacrymal.

Sécrété en permanence par l'œil, le film lacrymal protège sa surface (il forme aussi des larmes lorsqu'il s'échappe de l'œil). Il est constitué de trois couches dont deux, une couche de cellules nommées mucocytes et une phase lipidique, sont essentielles à sa stabilité et à la protection de la surface oculaire. Or même à très faible concentration (celle des collyres actuellement commercialisés), le chlorure de benzalkonium détruit les mucocytes et dissout la phase lipidique, ce qui entraîne une sécheresse oculaire. De plus, la sécheresse oculaire provoque un stress osmotique (la concentration des composés de part et d'autre de la cornée n'est plus à l'équilibre) qui accentue la toxicité du conservateur.

De fait, nombre de patients se plaignent que les gouttes aggravent leurs symptômes et préfèrent arrêter les instillations, quitte à retrouver la sécheresse d'avant traitement, plutôt que de subir les sensations de brûlures procurées par les collyres. Quant aux nombreux patients qui restent fidèles à leur prescription et mettent leur douleur sur le compte de la maladie sous-jacente, ils s'enferment dans un cercle vicieux où le collyre soulage temporairement, par son effet lubrifiant, mais en même temps induit une instabilité supplémentaire du film lacrymal qui entraîne des instillations de plus en plus fréquentes.

Les études cliniques à court terme ne retrouvent en général que peu d'effets toxiques spectaculaires. Toutefois, sur le

long terme et sur des yeux fragilisés, les conservateurs produisent des modifications profondes des systèmes de défense oculaires et des réactions inflammatoires à bas bruit (*voir l'encadré ci-dessous*). Ces effets sont particulièrement visibles dans le cas du glaucome, où la surface oculaire est en principe normale au début de la maladie. En revanche, dans des pathologies elles-mêmes inflammatoires, telles que les allergies chroniques ou les syndromes secs, les symptômes dus à la maladie préexistante sont difficiles à distinguer des aggravations dues aux conservateurs des collyres. Dans le doute, la suppression du conservateur (ou au moins la diminution de sa concentration lorsqu'il est nécessaire) est une étape indispensable dans le traitement de ces pathologies.

Des formulations sans conservateur sont actuellement de plus en plus développées en pharmacologie ophtalmologique. Jusqu'alors considéré comme neutre et sans intérêt, le conservateur fait désormais l'objet de recherches visant soit à éviter son instillation dans l'œil (développement de flacons permettant de le filtrer avant la libération de la goutte), soit à concevoir de nouveaux conservateurs peu ou pas toxiques.

Les chimiokines, des régulateurs clés

Aux côtés de ces recherches sur les conservateurs, d'autres visent à comprendre les mécanismes qui régissent la trabéculopathie associée au glaucome à angle ouvert, afin d'y déceler de nouvelles

Le chlorure de benzalkonium : toxique en profondeur

P principal conservateur des collyres actuels, le chlorure de benzalkonium est efficace pour éliminer les germes mais son utilisation n'est pas anodine pour l'œil. Cette

molécule agit rapidement aux membranes cellulaires, rompt les jonctions entre les cellules et pénètre en profondeur dans les tissus de l'œil.

Chez l'animal, une étude pharmacologique a montré qu'une semaine après l'instillation d'une seule goutte de chlorure de benzalkonium à une concentration standard, la molécule est encore détectée dans la conjonctive (cette membrane située sous la paupière sécrète le mucus du film lacrymal). Son accumulation au fil des ans peut ainsi conduire à des doses toxiques, susceptibles de pénétrer en profondeur.

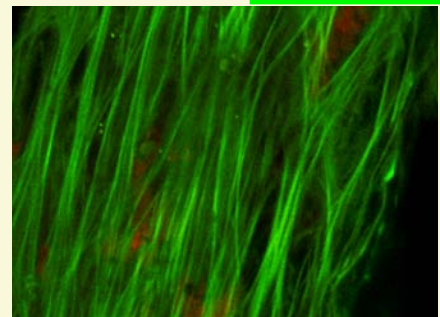
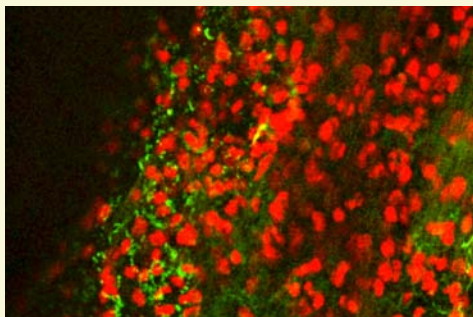
Parmi les cibles du chlorure de benzalkonium, le trabéculum, situé quelques dixièmes de millimètre au-dessous de la conjonctive et de la cornée, représente un tissu particulièrement sensible, car il est lui-même atteint au cours du glaucome (*voir la figure ci-contre*). Cette maladie entraîne une raréfaction des cellules, une densification des molécules qui entourent les cellules (la matrice extracellulaire) et une réaction inflammatoire conduisant à un cycle auto-entretenu de mort cellulaire. Ces dernières années, différents travaux ont montré que le chlorure de benzalkonium reproduit ces différents stades *in vitro* sur des cellules trabéculaires humaines.

L'accumulation de ce produit est donc susceptible d'augmenter l'altération du trabéculum au cours du glaucome. Cependant, comme le chlorure de benzalkonium est associé à un médicament faisant baisser la pression, il est difficile de déterminer l'impact de son éventuelle toxicité sur une remontée de la pression. Il pourrait s'agir d'une baisse d'efficacité du médicament. Or chez 40 pour cent des personnes atteintes d'un glaucome, la pression augmente à nouveau après quelques années d'un traitement, et on doit lui associer un autre médicament.

La toxicité et l'accumulation du chlorure de benzalkonium dans le trabéculum sont un sujet de controverse, car elles remettent en question certains dogmes sur l'innocuité des adjuvants médicamenteux et sur la tolérance des médicaments

proposés par l'industrie au vu des seules études cliniques. Cependant, il a été montré que le chlorure de benzalkonium, à forte dose, peut entraîner une trabéculopathie toxique, avec diminution de l'évacuation d'humeur aqueuse à travers un trabéculum altéré et, par suite, augmentation de la pression oculaire. Quant à l'atteinte des structures profondes, elle aussi controversée, nous l'avons montrée en 2012 : nous avons détecté le conservateur par spectrométrie de masse dans l'angle iridocornéen, le trabéculum et même le nerf optique après instillation pendant plusieurs mois chez un animal sain.

Ch. B, A. D. et W. R



OBSERVE AU MICROSCOPE confocal, un trabéculum humain glaucomateux (*à droite*) présente une raréfaction extrême de cellules trabéculaires (*en rouge*) et une densification de la matrice extracellulaire (*en vert*), par rapport à un trabéculum sain (*à gauche*).

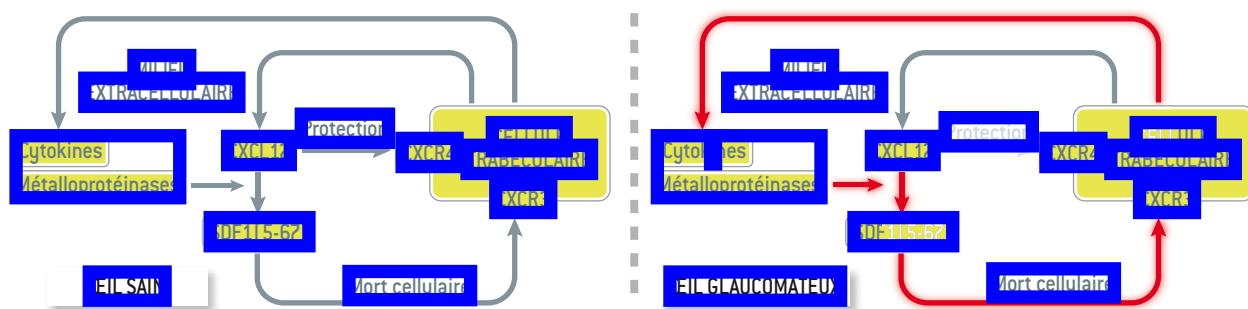
LA TRABECULOPATHIE : UN EQUILIBRE PERTURBE ?

Les mécanismes qui conduisent à l'altération du trabéculum dans les glaucomes à angle ouvert sont encore inconnus, même si nombre de protéines ont été recensées comme impliquées dans ces mécanismes : on connaît des acteurs potentiels, mais pas encore l'enchaînement de réactions qui conduit à la trabéculopathie. Parmi ces acteurs, plusieurs membres d'une famille de petites protéines produites par les cellules et libérées dans le milieu extracellulaire, les cytokines, sont particulièrement abondantes dans l'humeur aqueuse des patients atteints d'un glaucome à angle ouvert.

Les auteurs ont mis en évidence un mécanisme par lequel une telle modification du milieu extracellulaire pourrait dégrader le trabéculum. Dans le trabéculum d'un œil sain, une protéine

libérée par les cellules, la chimiokine CXCL12, participe à la stabilisation du nombre de cellules trabéculaires (à gauche) : en se liant à son récepteur CXCR4 sur ces cellules, elle les protège. Et quand les cellules sont trop nombreuses, des cytokines et des enzymes [métalloprotéinases] qu'elles produisent clivent la chimiokine en une forme tronquée – SDF1(5-67) – qui, elle, induit la mort des cellules *via* son récepteur CXCR3.

Par son augmentation lors d'un glaucome à angle ouvert, la concentration de cytokines et de métalloprotéinases dans le milieu extracellulaire perturberait cet équilibre en faveur de la forme tronquée (à droite) : elles augmenteraient le clivage de la chimiokine, ce qui diminuerait son effet protecteur et favoriserait la mort des cellules du trabéculum.



bistes thérapeutiques. Nous avons ainsi montré que des molécules participant au déclenchement des réactions inflammatoires, des chimiokines, sont impliquées dans l'altération du trabéculum.

Les chimiokines sont de petites protéines qui ont un puissant effet « chimioattractant » sur certaines cellules immunitaires : produites et libérées en quantité par les cellules « en détresse », elles se lient aux cellules immunitaires *via* des récepteurs, entraînant leur migration et leur activation sur le site perturbé – l'inflammation. Ce n'est pas leur seule fonction. Produites aussi en plus faible concentration en dehors des conditions inflammatoires, elles régulent la communication entre les cellules, leur viabilité et la composition du milieu extracellulaire dans leur environnement proche.

Or les altérations du trabéculum constatées au cours d'un glaucome à angle ouvert recoupent plusieurs de ces fonctions. Le trabéculum sain est constitué de cellules entourées de protéines fibreuses – la matrice extracellulaire –, l'ensemble formant un tissu poreux qui laisse passer l'humeur aqueuse. Lors d'un glaucome à angle ouvert, les cellules trabéculaires se raréfient, la matrice se densifie et une réaction inflammatoire se produit.

Nous avons donc émis l'hypothèse qu'une ou plusieurs chimiokines et leurs récepteurs pourraient être impliqués dans la trabéculopathie glaucomateuse. Nous nous sommes intéressés en particulier à une chimiokine nommée CXCL12. Pourquoi celle-ci ? Parce qu'il avait été montré en 2006 que cette protéine peut être clivée par des enzymes du milieu extracellulaire et que sa forme tronquée, nommée SDF1(5-67), a un autre rôle : alors que CXCL12 favorise la viabilité des cellules en se liant à leur surface à son principal récepteur, nommé CXCR4, sa forme tronquée entraîne la mort des cellules par l'intermédiaire d'un autre récepteur, CXCR3. Ces travaux suggéraient que l'environnement extracellulaire pouvait conditionner la fonction de CXCL12 en modifiant son affinité pour certains récepteurs. La trabéculopathie glaucomateuse pouvait-elle être liée à une perturbation de ce conditionnement ?

C'est en effet ce que nous avons observé. Nous avons d'abord vérifié que la chimiokine CXCL12 et ses récepteurs CXCR3 et CXCR4 étaient bien présents dans les trabéculums de patients glaucomateux et sur une lignée de cellules humaines de trabéculum. Ensuite, nous avons recherché si les cellules trabéculaires produisaient la forme tronquée de CXCL12 et dans quelles

conditions. Nous avons ainsi montré que les cellules trabéculaires produisent CXCL12 et sa forme tronquée sous le contrôle de diverses protéines libérées par les cellules dans le milieu extracellulaire : dans le trabéculum sain, il existe un équilibre entre la chimiokine CXCL12, qui favorise la viabilité cellulaire *via* son récepteur CXCR4, et sa forme tronquée, qui induit la mort cellulaire en se liant à son récepteur CXCR3. Lors d'un glaucome à angle ouvert, on détecte dans le milieu extracellulaire une augmentation de la quantité des protéines qui contrôlent cet équilibre. Cette augmentation perturberait l'équilibre en faveur de la forme tronquée, donc en faveur de la mort cellulaire.

Cibler les récepteurs des chimiokines

De plus, chez le rat atteint d'un glaucome, quand on empêche la forme tronquée de se lier à son récepteur (en bloquant l'accès à l'aide d'un « antagoniste », une molécule qui empêche la chimiokine d'agir sur son récepteur), la fonction du trabéculum est restaurée, la pression diminue et la dégénérescence des neurones de la rétine est inhibée ; la fonction visuelle est ainsi protégée pendant plusieurs mois (voir la figure 2).

Ces travaux montrent qu'une chimio-
kine et ses récepteurs sont impliqués dans
le contrôle de la fonction et de la viabilité
du trabéculum, et qu'en bloquant l'accès à
un récepteur, CXCR3, on peut traiter chez
l'animal l'élévation de pression oculaire
et la neuropathie associée. Ces résultats
ouvrent de nouvelles pistes thérapeutiques
où l'on ciblerait spécifiquement certains
récepteurs de chimiokines au cours du
glaucome. Cette stratégie permettrait non
seulement de réduire la pression oculaire,
mais aussi, peut-être, de diminuer voire
prévenir la trabéculopathie elle-même,
donc le cœur de la maladie glaucomateuse.

Par le passé, les stratégies thérapeu-
tiques visant les chimiokines dans d'autres
pathologies, en particulier du système
immunitaire, se sont souvent heurtées non
pas à leur inefficacité, mais à la survenue
d'effets secondaires délétères. De fait, les
chimiokines et leurs récepteurs sont pré-
sents dans tout l'organisme, et inhiber
leurs interactions *via* une molécule géné-
ralement administrée par voie orale ou par
injection perturbe l'équilibre cellulaire et
circulatoire de façon globale. En ophtalmo-

logie, la problématique est différente, car
l'administration peut s'effectuer au contact
de l'œil par l'emploi d'un collyre, et donc
sans les effets d'un traitement administré
par voie générale.

Le nerf optique, le parent pauvre

Qu'il s'agisse de viser les chimiokines ou
d'autres cibles, toutes les stratégies de trai-
tement du glaucome reposent encore sur
l'abaissement de la pression intra-oculaire.
Aucune approche pour protéger et *a fortiori*
régénérer le nerf optique après destruction
par un glaucome ne s'est révélée efficace en
pratique clinique. Pourtant, *in vitro* ou *in vivo*,
de nombreuses molécules ont le potentiel
de réaliser une telle neuroprotection. Les
plus étudiées sont les antagonistes des
récepteurs du glutamate, une molécule
qui assure la communication entre les neu-
rones. Lors d'un glaucome, on observe
un excès de ce neuromédiateur dans les
zones de communication entre neurones
(les synapses), qui entraîne la destruction
du neurone. Les antagonistes étudiés sont

prometteurs, car ils ciblent ce phénomène.
Néanmoins, la démonstration clinique
demeure un échec.

D'autres molécules qui imitent un autre
neuromédiateur (l'adrénaline), les alpha-2-
agonistes, semblent donner des résultats
intéressants en termes de neuroprotection.
Un représentant de cette famille, la brimo-
nidine, commercialisé comme collyre pour
faire baisser la pression oculaire, a en effet
une affinité pour des récepteurs présents
à la surface des neurones de la rétine. Ins-
pillée à une concentration suffisante, elle
active des molécules qui protègent les
neurones et favorise la sécrétion de fac-
teurs neurotrophiques, des protéines qui
assurent la croissance et l'entretien des
neurones. Même si les résultats cliniques
semblent prometteurs, en particulier ceux
concernant de nouvelles approches de
thérapie génique, il n'y a cependant pas
de démonstration définitive de l'efficacité
neuroprotectrice de ces traitements. Aussi,
pour le moment, la meilleure neuropro-
tection semble donc rester l'abaissement
de la pression intra-oculaire, quels qu'en
soient les moyens.

Pour contribuer à la transmission
de la culture mathématique,
LE MAGAZINE TANGENTE ORGANISE

LES TROPHÉES
tangente

DEPOT DES CANDIDATURES
AVANT LE 31 AOÛT 2014 MINUIT

Prix Bernard-Novelli

Soutenir les jeunes créateurs

Vous êtes collégiens, lycéens ?
Vous aimez concevoir des jeux logiques
faisant intervenir les mathématiques ?

Participez à ce concours
et transformez votre projet
en un produit mobile disponible
sur l'App Store et Google Play



Prix Tangente du meilleur article

Raconter les mathématiques

Envoyez-nous un article inédit vulgarisant un concept mathématique.
Le meilleur sera publié au sein du magazine *Tangente*

Prix Tangente du livre

Donner envie d'en savoir plus

A partir du 15 juin, participez
à la sélection des ouvrages
en votant sur :
www.tropheestangente.com



Prologin
CASIO
Magma Mobile
Your Joyful Escape

Inria
INVENTEURS DU MONDE NUMÉRIQUE
POUR LA
SCIENCE

Inscriptions, informations et modalités de participation sur le site

www.tropheestangente.com

Les chauves-souris et d'autres prédateurs se servent des sons pour détecter leurs proies. Mais celles-ci ont développé des stratégies de camouflage acoustique.

Une course aux armements acoustiques

William Conne

Avez-vous déjà vu un hibou fondre sur un campagnol qui se déplace sous une couche de feuilles sèches ? Dans l'affirmative, vous avez pu constater l'efficacité de sa stratégie de détection, fondée sur une écoute passive, c'est-à-dire sur la détection des sons émis par ses proies. D'autres animaux – la plupart des chauves-souris et certains odontocètes (des cétacés à dents, tels les dauphins) – ont une stratégie active : ils émettent des sons et captent les échos, une technique qualifiée d'écholocalisation ou de sonar biologique. Les échos leur permettent de s'orienter dans leur environnement et de détecter les proies. En quelque sorte, ils voient grâce au son.

L'écholocalisation s'est développée il y a plus de 65 millions d'années chez les chauves-souris, et plus récemment chez les odontocètes. Le sonar biologique est une merveille technique, qui inspire les ingénieurs. Ces derniers ont développé des systèmes équivalents, les radars et les sonars, installés dans des stations au sol ou dans

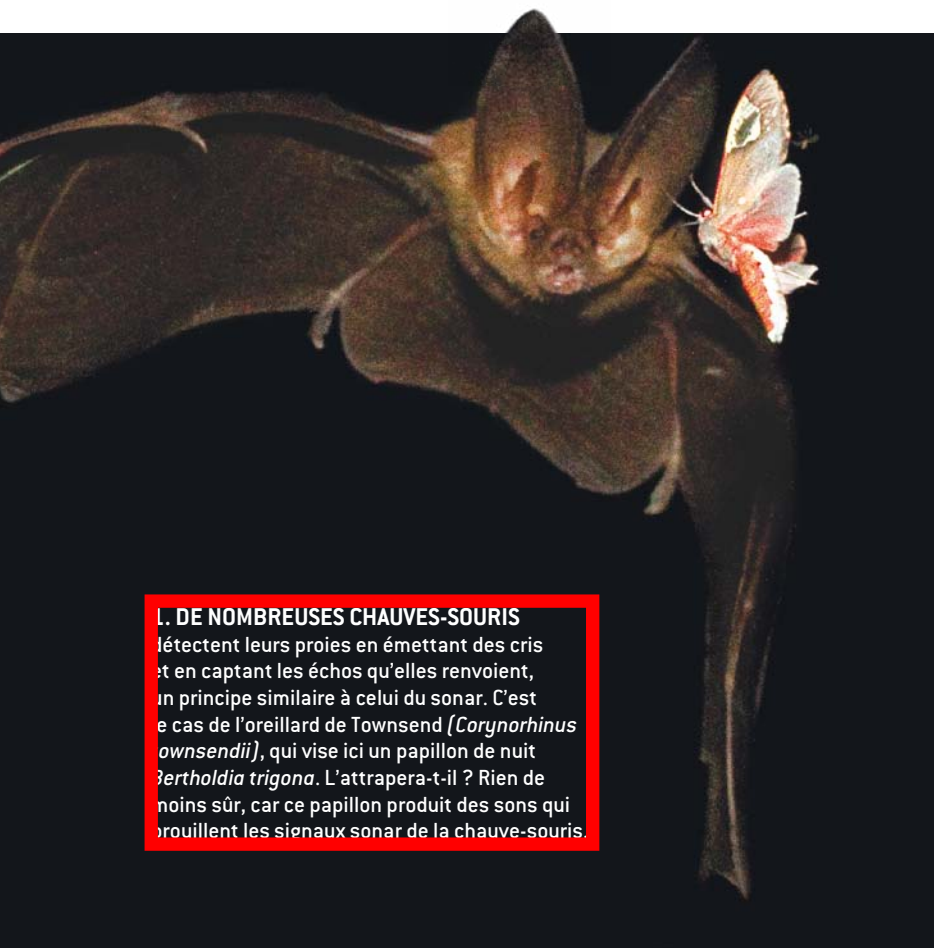
des véhicules aériens et sous-marins. Ces systèmes partagent de nombreuses caractéristiques avec l'écholocalisation animale dans la façon de produire, d'émettre, de recevoir et de traiter les signaux. Et le plus étonnant est peut-être que, chez les animaux comme chez les hommes, des contre-mesures sont apparues, telles des méthodes de furtivité et de brouillage du signal.

Un radar (*R*adio *D*etection *A*nd *R*anging, en français détection et télémétrie radio) émet des ondes radio, dont les échos après réflexion sur les objets sont détectés par une antenne. Si l'objet se déplace, les signaux réfléchis ont une fréquence différente, ce qui permet de déduire la vitesse de la cible. On utilise les ondes radio parce qu'elles parcourent de grandes distances dans l'air, même en présence de brouillard et de précipitations. Les ondes sonores se propagent mieux sous l'eau, ce qui a conduit au développement du sonar (*S*ound *N*avigation *A*nd *R*anging, en français navigation et télémétrie par le son) pour la détection dans ce milieu.

Le signal est différent, mais le principe est le même.

De nombreux scientifiques ont contribué au développement du radar, tels l'inventeur américano-serbe Nikola Tesla, et Guglielmo Marconi, l'ingénieur italo-britannique qui fut le premier à transmettre un signal radio d'un côté de l'Atlantique à l'autre. La mise au point de systèmes fonctionnels s'est accélérée à l'approche de la Seconde Guerre mondiale. Le premier d'entre eux, nommé *Chain Home*, comprenait une série de stations radar réparties sur les côtes sud et est de l'Angleterre. Il visait à détecter les bombardiers allemands qui se massaient dans l'espace aérien français, afin de permettre aux avions de combat anglais de se positionner à haute altitude pour les repousser.

Le développement du sonar précède d'une trentaine d'années celui du radar. Il s'intègre également dans une course aux armements, puisque l'objectif était de repérer les sous-marins de la Première Guerre mondiale. Les premiers dispositifs, installés sur des navires allemands, étaient fondés



1. DE NOMBREUSES CHAUVES-SOURIS

détectent leurs proies en émettant des cris et en captant les échos qu'elles renvoient, en principe similaire à celui du sonar. C'est le cas de l'oreillard de Townsend (*Corynorhinus townsendii*), qui vise ici un papillon de nuit *Bertholdia trigona*. L'attrapera-t-il ? Rien de moins sûr, car ce papillon produit des sons qui brouillent les signaux sonar de la chauve-souris.

sur une écoute passive : des microphones sous-marins (ou hydrophones) pouvaient détecter aussi bien les sons des torpilles en approche que ceux des navires éloignés. Le naufrage du *Titanic* a aussi stimulé le développement du sonar, susceptible de repérer les icebergs dans l'obscurité et le brouillard. Les dispositifs actifs sont apparus pendant l'entre-deux-guerres. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, la plupart des navires de guerre américains et britanniques étaient équipés de sonars sous-marins.

L'étude du sonar biologique et l'élaboration de dispositifs artificiels se sont souvent nourries l'une de l'autre. Sir Hiram Maxim, un inventeur américano-britannique du début du XX^e siècle, a voulu doter les navires d'un système inspiré de l'écholocalisation des chauves-souris, afin de prévenir les collisions. Malheureusement, les connaissances en la matière étaient rudimentaires à l'époque, et il n'est pas parvenu à développer un dispositif fonctionnel. Maxim pensait que les chauves-souris s'orientaient grâce à

L'ESSENTIEL

Certains animaux émettent des ondes acoustiques et repèrent leurs proies grâce aux échos qu'elles produisent

Les chauves-souris sont ainsi capables de percevoir jusqu'aux battements d'ailes des insectes.

Des techniques d'atténuation des échos et d'émission de bruits parasites sont alors apparues chez ces derniers. Cette « course aux armements » dure depuis plus de 55 millions d'années.

des signaux de basse fréquence produits par leurs battements d'ailes. Le physicien George Washington Pierce, qui a travaillé au laboratoire anti-sous-marins de la marine américaine, a plus tard aidé le zoologiste Donald Griffin à éclaircir les mécanismes de l'écholocalisation des chauves-souris. Il a développé un microphone fondé sur des matériaux piézoélectriques (qui produisent de l'électricité en réponse à un stress mécanique). Cet appareil a permis d'enregistrer pour la première fois les cris ultrasonores sur lesquels repose le système d'écholocalisation des chauves-souris.

Voir loin ou voir petit

Qu'ils soient biologiques ou artificiels, les dispositifs de radar et de sonar actifs émettent des trains d'onde. La longueur d'onde du signal est proportionnelle à la taille de la structure qui le produit (ainsi, plus une corde de guitare est raccourcie en étant pincée sur le manche, plus elle émet un son aigu, c'est-à-dire de courte longueur d'onde). Celle des ondes émises par les radars du *Chain Home* était de 12 mètres. Les stations étaient constituées de quatre tours de 110 mètres de hauteur, espacées de 55 mètres et reliées par un réseau de câbles d'acier magnétisés. Les cordes vocales d'une chauve-souris, en revanche, sont minuscules et produisent des ultrasons, de courtes longueurs d'onde (voir la figure 2).

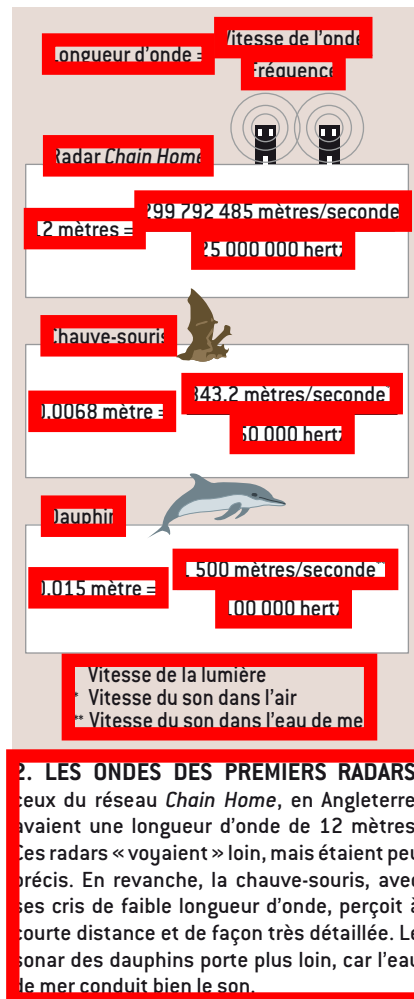
La portée du signal dépend de sa longueur d'onde et de sa fréquence : plus la longueur d'onde est grande (ou, de façon équivalente, plus la fréquence est basse), plus le signal voyage loin. Ainsi, la grande longueur d'onde des signaux émis par le *Chain Home* permettait la détection d'objets éloignés. De même, les infrasons, dont les fréquences sont inférieures à 25 hertz (ou oscillations par seconde), se propagent relativement loin dans l'air. Les éléphants et d'autres gros animaux terrestres les utilisent pour communiquer à grande distance, sur environ deux kilomètres. En revanche, les ultrasons des chauves-souris, dont les fréquences dépassent 20 000 hertz, sont vite absorbés par les molécules d'air, ce qui limite leur efficacité à quelques mètres seulement.

Autre relation importante, plus la longueur d'onde est courte, meilleure est la résolution. Avec des signaux de grandes longueurs d'onde, on détecte bien de gros

objets tels que des navires en mer, mais ils sont moins efficaces pour les cibles plus petites. Et de fait, si les premiers radars pouvaient repérer un groupe d'avions en approche, ils peinaient à déterminer leur nombre. En revanche, avec leur sonar à courte longueur d'onde, les chauves-souris détectent des insectes aussi petits que les moustiques, coléoptères et papillons de nuit qui constituent leur alimentation. Jim Simmons, de l'Université Brown, aux États-Unis, a montré qu'elles atteignent une résolution de l'ordre du micromètre, ce qui leur permettrait de percevoir jusqu'à la texture de surface de leurs cibles.

Un radar ou un sonar produit un faisceau assez comparable à celui d'une lampe de poche. Les faisceaux étroits permettent de concentrer la puissance du signal dans une direction donnée et ainsi de détecter des cibles plus lointaines. Ils améliorent également la précision avec laquelle on détermine la direction de la cible. Les ingénieurs contrôlent la forme d'un faisceau radar en faisant varier la distance entre les éléments émetteurs de l'antenne et la longueur de celle-ci. Les animaux aussi peuvent contrôler la forme du faisceau. En 2009, Rolf Müller, de l'Université Virginia Tech, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les étonnantes « feuilles » nasales du rhinocéros de Bourret (une espèce de chauve-souris) lui permettent de produire un faisceau sonar très focalisé, qui optimise ses capacités de détection (voir la figure 3).

Il peut aussi être utile de contrôler dynamiquement la forme du faisceau. Certaines lampes de poche, par exemple, ont un faisceau lumineux dont la forme est modifiable. Des faisceaux étroits sont efficaces pour repérer avec précision des cibles éloignées, tandis que des faisceaux larges permettent de balayer une zone plus étendue (mais plus proche). Certains odontocètes, tels les bélugas et les fausses orques (voir la figure 3), sont capables de localiser leur faisceau d'écholocation en ajustant la forme d'une « lentille acoustique » remplie d'huile, située dans leur front et nommée melon. En 2012, Lasse Jakobsen et ses collègues de l'Université du Danemark du Sud ont montré que certaines chauves-souris adaptent leur sonar au contexte. En ouvrant grand leur bouche et en augmentant la fréquence de leur cri, elles produisent un faisceau plus étroit, permettant de « voir » plus



loin ; en faisant l'inverse, elles émettent un faisceau plus large, qui sonde une zone plus étendue.

D'autres techniques sont utilisées à la fois par les ingénieurs et par leurs homologues animaux. Le balayage de fréquences, par exemple, peut augmenter de deux ordres de grandeur le pouvoir séparateur radial (qui quantifie la capacité à distinguer deux objets situés à des distances voisines). Certaines chauves-souris (parfois nommées chauves-souris FM, pour *frequency modulating*) font ainsi varier la fréquence de leurs cris. Elles chassent dans des environnements complexes, attrapant leurs proies entre les branches d'arbres ou au sommet de la végétation, voire à la surface de l'eau. D'autres chauves-souris produisent un signal de fréquence constante (elles sont qualifiées de chauves-souris CF, pour *constant frequency*). L'avantage est qu'elles peuvent alors mesurer la vitesse relative des proies grâce aux décalages Doppler des variations de fréquence perçues quand l'émetteur du signal est en mouvement par rapport au récepteur) : de même que le sifflet d'un train paraît plus aigu quand il s'approche de vous, l'écho sur un papillon de nuit semble plus aigu à la chauve-souris quand l'insecte vole vers elle. Nous y reviendrons.

La distinction entre chauves-souris FM et CF semble aujourd'hui restrictive, car on a découvert que certaines espèces alternent les deux types d'émission. Elles utilisent des signaux à bande étroite pour la détection de proies à distance, puis passent au balayage de fréquences au moment de l'attaque, lorsque le pouvoir séparateur radial devient critique pour assurer la prise (voir la figure 4).

L'influence du milieu

Outre la longueur d'onde et la focalisation du faisceau, les caractéristiques du milieu influent sur la distance de propagation. Les ondes électromagnétiques des radars sont peu atténuées dans l'air, tandis que le son s'y propage beaucoup moins bien et est davantage sujet aux caprices de l'environnement, tels le vent ou la pluie.

Sous l'eau, en revanche, le son est roi. Il se propage sur de grandes distances et l'énergie sonore n'est absorbée qu'à raison de un pour cent par kilomètre environ. Cela permet aux baleines de communi-

quer à travers l'immensité des océans. La communication à grande distance sous l'eau est facilitée par la présence de canaux naturels de transmission sonore, que suivent les ondes : à mesure que l'on descend, la vitesse du son est modifiée par les changements de température, de salinité et de pression (voir la figure 5), et on montre qu'en raison de ces gradients de vitesse, les ondes sonores se courbent et se focalisent à certaines profondeurs particulières. Dans l'océan, l'un de ces canaux est en surface : les ondes sonores se courbent vers la surface, sur laquelle elles rebondissent, se propageant de bonds en bonds sur de grandes distances. Plus en profondeur, un deuxième canal (nommé SOFAR, pour *SOund Fixing And Ranging*, ou Extension et stabilisation du son) piège les sons. Ces canaux limitent la dispersion du son et les sous-marins comme les mammifères marins les mettent à profit pour optimiser la puissance sonore diffusée (voir la figure 5).

Le rayonnement électromagnétique, quant à lui, est tellement atténué en milieu aquatique qu'il n'y est pas très utilisé : pour la plupart des longueurs d'onde,

L'AUTEUR



William CONNER est professeur de biologie et titulaire de la chaire David et Lelia Farr d'innovation, de créativité et d'entrepreneuriat à l'Université de Wake Forest, en Caroline du Nord, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

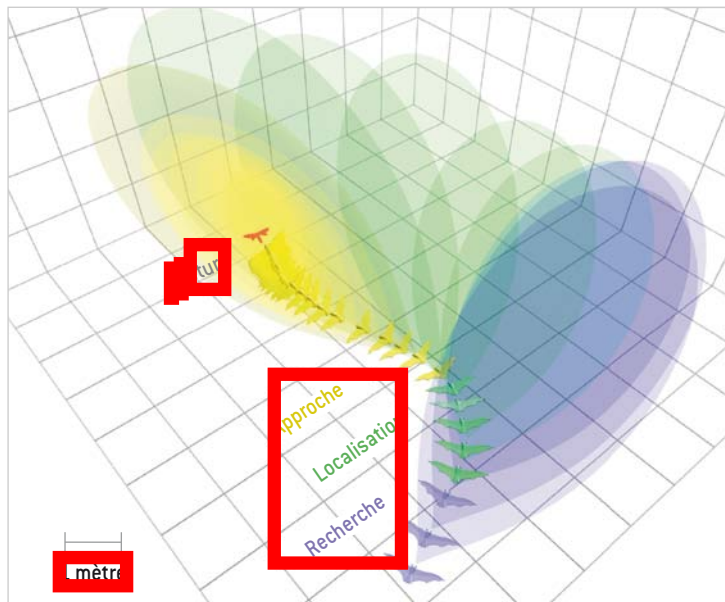
l'eau absorbe 99,99 pour cent de l'énergie du rayonnement par mètre parcouru. Notons que dans l'étroite bande de 400 à 700 nanomètres, qui correspond à la lumière visible, le rayonnement est moins atténué ; les organismes aquatiques l'exploitent pour la communication visuelle.

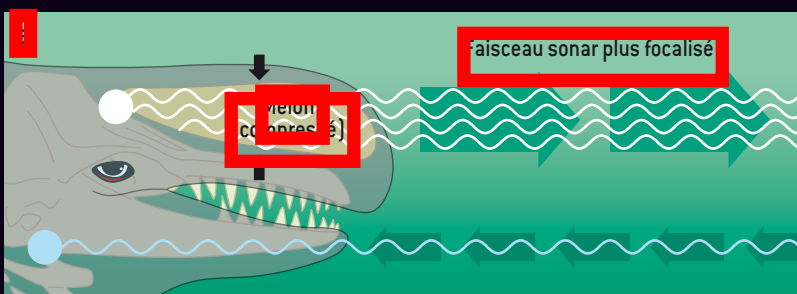
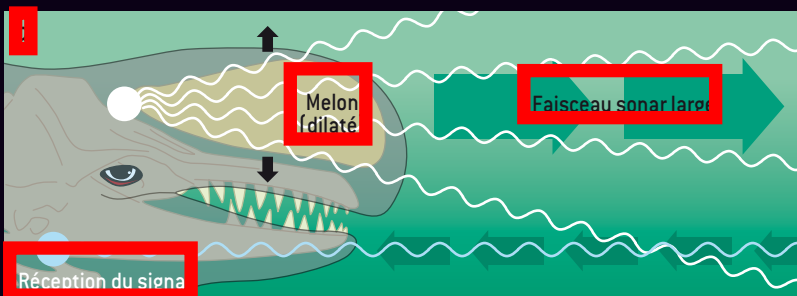
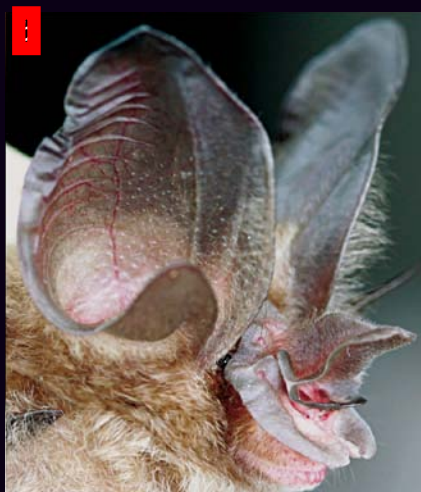
Les radars et les sonars détectent respectivement les signaux grâce à des antennes et des hydrophones piézoélectriques. Comme de nombreux mammifères, les chauves-souris captent les sons par les oreilles. Celles-ci comprennent un tympan, qui vibre au rythme du son porté par l'air, et un organe rempli de liquide, nommé cochlée, qui traduit les vibrations mécaniques en influx nerveux. La vibration est transmise du tympan à la cochlée par de petits os (les osselets de la chaîne ossiculaire).

Les grands pavillons mobiles des oreilles agissent comme des déflecteurs paraboliques, qui acheminent le son vers le conduit auditif. Chez de nombreuses espèces de chauves-souris, leur taille est liée à la plage de fréquences des signaux sonar produits : les oreilles sont d'autant plus petites que les fréquences sont élevées. Les plus grandes sont l'apanage des chauves-souris dites

COMMENT LES CHAUVES-SOURIS DETECTENT LEUR PROIE

La chauve-souris commence par chercher sa proie avec des faisceaux directionnels d'ondes acoustiques (en violet), similaires aux faisceaux électromagnétiques des radars. Jusqu'à ce qu'elle accroche une cible (en vert). Elle diminue alors l'intensité de ses cris pour maintenir les échos à un niveau sonore constant pendant la poursuite (en jaune). La reconstitution tridimensionnelle ci-contre montre le faisceau acoustique d'une chauve-souris attaquant un papillon de nuit. Elle est fondée sur les positions des protagonistes et les intensités des cris enregistrés pendant une attaque réelle d'une chauve-souris du genre *Myotis*. La forme et la direction du faisceau ont été établies à partir des données scientifiques préexistantes, et son volume correspond à celui qui serait « éclairé » par des intensités sonores d'au moins 20 décibels. Les graphiques bidimensionnels (ci-dessous) présentent la forme et l'intensité du faisceau d'écholocalisation (d'autant plus importante qu'il est grand), ainsi que sa direction par rapport à la cible.





3. PLUS LE FAISCEAU SONAR EST FOCALISÉ, plus il porte loin et est précis, mais moins la zone balayée est large. Les chauves-souris du genre *Rhinolophus* [a, b] émettent leurs signaux par le nez. Celui du rhinolophe de Bourret [b] a une structure permettant de bien focaliser le faisceau. La fausse orque *Pseudorca crassidens* [c] peut faire varier cette focalisation en modifiant la forme d'une lentille acoustique naturelle – une structure remplies de fluide située dans son front et nommée melon [d, e].

glaneuses, qui chassent souvent des proies au sol ou à la surface de l'eau (tandis que d'autres attrapent les papillons de nuit en vol), et utilisent l'écoute passive pour trouver leurs cibles. Elles peuvent entendre le battement des ailes d'un papillon ou les pas d'un mille-pattes qui marche dans le voisinage. Les pavillons auriculaires jouent aussi un rôle important dans la localisation de l'émission sonore. Chacun sert d'antenne acoustique directionnelle et les différences entre les intensités et les temps d'arrivée, permettent de localiser la source.

Comme celle des autres mammifères, la cochlée de la chauve-souris comporte une « membrane basilaire ». Il s'agit d'une structure rigide où sont fixées les cellules ciliées internes, qui transforment les vibrations en signaux électriques. Chaque partie de cette membrane vibre en réponse à une plage particulière de fréquences. Via le nerf auditif, les cellules ciliées transmettent alors l'information au cerveau, qui finit de traiter le signal.

Déterminer la distance et la vitesse de la cible

La chauve-souris détermine l'éloignement de sa cible grâce à la mesure précise du moment d'arrivée de l'écho. Ce dernier est difficile à extraire du bruit de fond, dont l'intensité peut être mille fois plus puissante. Le cerveau de l'animal effectue un traitement qualifié de corrélation croisée, c'est-à-dire qu'il conserve une copie du signal perçu au moment de son cri et compare en continu ce qu'il entend à cette copie, jusqu'à ce qu'il obtienne une bonne correspondance. Cette méthode est encore plus efficace chez les chauves-souris qui modulent la fréquence de leur cri.

La cible localisée, une information importante manque encore : sa vitesse relative. Pour la déterminer, la chauve-souris évalue le décalage Doppler. Imaginez une chauve-souris qui vole au-dessus de la végétation. Tous les éléments du fond, tels le sol, les arbres et les buissons ont une vitesse relative égale à la vitesse de la chauve-souris. Imaginez maintenant un papillon de nuit solitaire qui vole vers le prédateur. Sa vitesse relative – et donc le décalage Doppler du son qu'il renvoie – est différente. En conséquence, son écho n'a pas la même fréquence que ceux renvoyés par le fond, dont il se démarque.

Certaines chauves-souris qui émettent un cri de fréquence constante atteignent une telle précision dans la mesure des décalages Doppler qu'elles peuvent détecter le mouvement des ailes d'un papillon, une information intéressante pour distinguer le type de proie. C'est ce qu'a montré l'équipe de Han-Ulrich Schnitzler, de l'Université de Tübingen, en Allemagne, sur le murin à moustaches (*Pteronotus parnellii*). Les chauves-souris mobilisent alors une part significative de leurs ressources cérébrales pour mesurer les décalages Doppler. Une portion importante de leur membrane basilaire est consacrée à l'étroite bande entourant la fréquence qu'elles émettent. Cette portion de la membrane est sur-nommée fovéa auditive, par analogie avec la fovéa de l'œil (la partie centrale de la rétine, qui contient une grande concentration de récepteurs lumineux). Grâce à elle, la résolution spectrale est maximale autour de la fréquence émise. Notons que le mouvement des ailes peut aussi être détecté à partir des variations d'amplitude de l'écho (voir la figure 6).

La détection sonar ou radar est notablement gênée par le nuage d'échos, c'est-à-dire la réception d'échos parasites, renvoyés par des objets non ciblés. Les échos indésirables sont par exemple produits par la pluie ou par diverses surfaces. Ainsi, le même problème se pose à un radar positionné à haute altitude qui tente de détecter un avion survolant un fond urbain en rase-motte et à une chauve-souris qui traque un papillon volant près d'un buisson : les bâtiments et les feuilles renvoient une multitude d'échos complexes et perturbants. Là encore, les chauves-souris exploitent les décalages Doppler. Certaines utilisent aussi un second stratagème : elles émettent des sons par paires, chaque cri ayant une fréquence différente, ce qui leur permet de trier plus efficacement les échos et de mieux les distinguer des parasites.

Mesures et contre-mesures

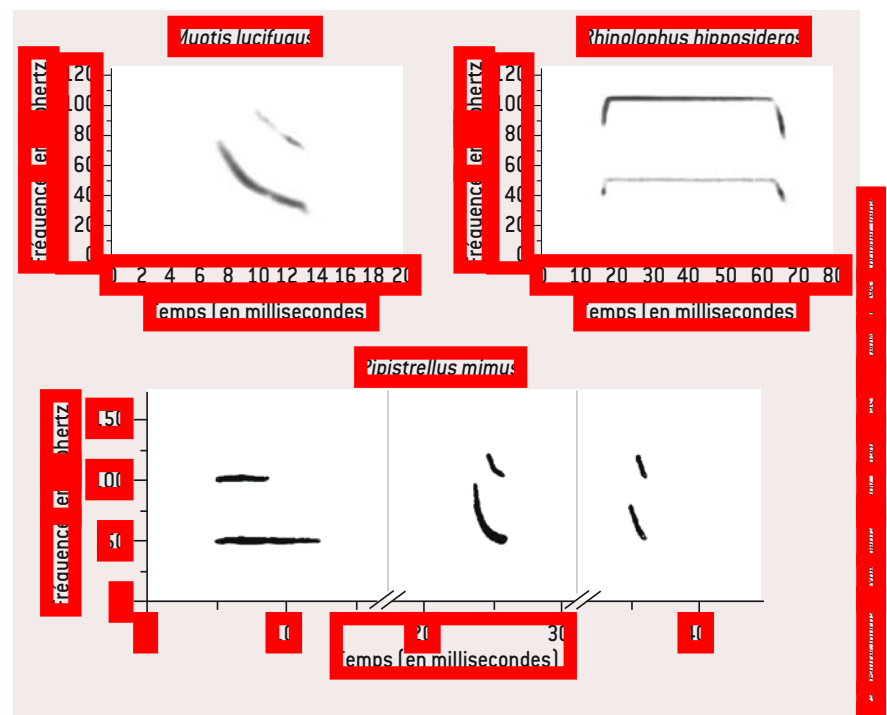
Malgré tout, certains insectes parviennent à se dissimuler dans le nuage d'échos. Les papillons de nuit *Hepialus humuli* se cachent aux chauves-souris en s'accouplant juste au-dessus de la végétation (à moins de 50 centimètres d'elle), de sorte que leur écho se fond dans ceux des feuilles et des tiges avoisinantes. De nombreux

les écailles qui recouvrent les ailes des papillons de nuit absorbent les cris des chauves-souris, éliminant ainsi l'amplitude des échos renvoyés et compliquant la détection

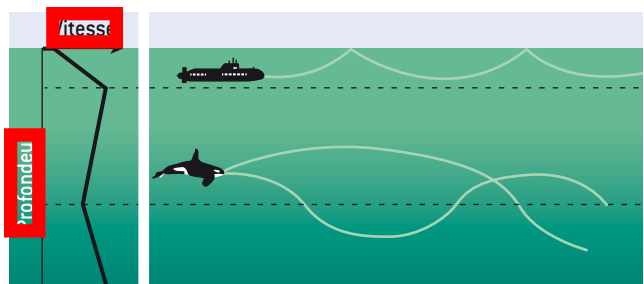
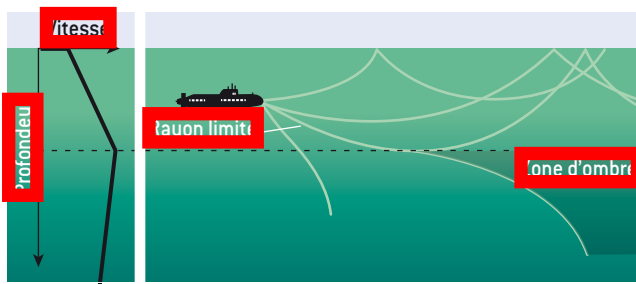
autres insectes utilisent probablement cette stratégie de camouflage.

Chez l'homme, chaque progrès des systèmes de radar et de sonar donne lieu à des efforts pour mettre au point une contre-mesure. Les ingénieurs ont ainsi conçu des avions dits furtifs, en réduisant notablement leur « surface équivalente radar » (ou RCS, pour *radar cross section*) : ce paramètre, exprimé en mètres carrés, quantifie la propension d'un objet à renvoyer le rayonnement électromagnétique vers le radar, et mesure donc sa détectabilité. Selon certaines rumeurs, les bombardiers furtifs B-2 auraient une RCS de la taille d'un timbre postal. Elle aurait été obtenue en cachant les réacteurs et les gouvernes à l'intérieur des ailes, en accentuant les angles des composants qui dévient les ondes radar hors du champ des récepteurs et en utilisant des matériaux composites et des peintures qui absorbent les ondes incidentes ou atténuent leur réflexion.

Les insectes sont aussi lancés dans une course à la furtivité. Certains, appréciés des chauves-souris, atténuent l'écho qu'ils produisent. En 2011, Jinyao Zeng et ses collègues de l'Université normale de la Chine de l'Est, à Shanghai, ont suggéré

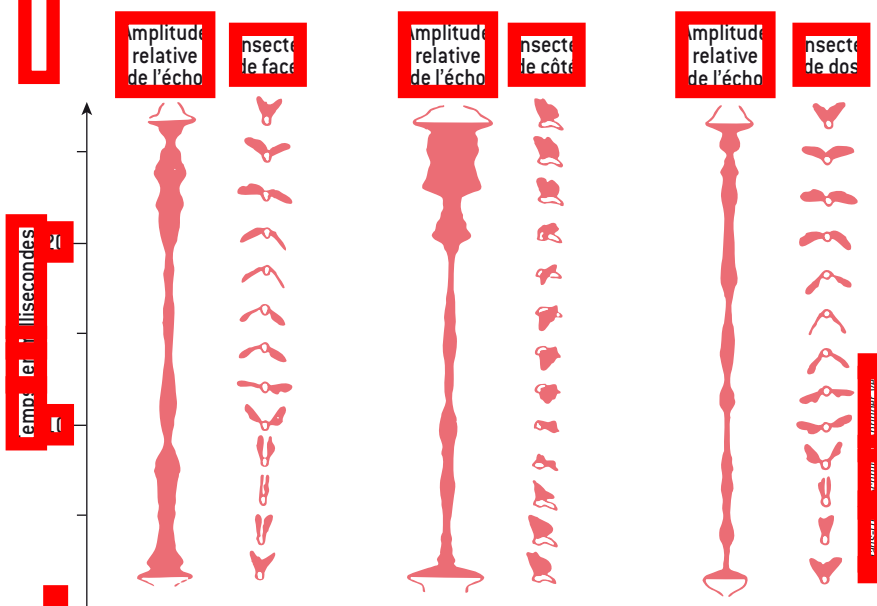


4. LA FREQUENCE DU CRI varie chez certaines chauves-souris, dites à modulation de fréquence (spectrogramme en haut à gauche), tandis qu'elle reste constante chez d'autres espèces (en haut à droite). Une fréquence constante permet de mieux déterminer la vitesse de la proie, mais un balayage de fréquences améliore la résolution. Certaines chauves-souris sont capables de passer d'un mode à l'autre selon les besoins (en bas).



5. LA VITESSE DU SON DANS L'OCEAN varie en fonction de la profondeur. Par conséquent, les ondes acoustiques sont focalisées dans des canaux naturels. Celles émises par un sous-marin se courbent vers la surface et se propagent sur de longues distances via une succession de rebonds (à gauche). Cependant, pour les

ondes qui plongent en dessous d'un rayon limite, la courbure s'inverse à partir d'une certaine profondeur, ce qui crée une zone d'ombre où aucun signal ne pénètre. Un mammifère marin nageant à la plus grande profondeur peut envoyer ses cris dans un autre canal, nommé SOFAR, dont la profondeur varie avec la latitude (à droite).



5. L'AMPLITUDE DE L'ÉCHO RENVOYÉ PAR UN INSECTE varie suffisamment au cours de son battement d'ailes pour que certaines chauves-souris détectent ces changements, ce qui leur permet de déterminer le type de proie. L'écho capté dépend aussi de l'orientation de l'insecte par rapport au prédateur ou au dispositif d'enregistrement.

que les écailles recouvrant les ailes des papillons de nuit absorbent les cris des chauves-souris, diminuant ainsi l'amplitude des échos renvoyés et compliquant la détection. Ces écailles font plus que doubler le coefficient d'absorption des ailes pour les fréquences comprises entre 40 et 60 kilohertz, ce qui se traduit par une baisse d'intensité de l'écho allant jusqu'à deux décibels. Les mécanismes d'absorption du son restent à préciser, mais ils pourraient être voisins de ceux des matériaux antibruit fabriqués par l'homme : les écailles sont souvent séparées par des espaces et recouvertes de micropores et de lacunes (des espaces oblongs) ressemblant à ceux des matériaux artificiels. Les éthologistes commencent juste à mettre en évidence ces cas de furtivité

naturelle, où les proies se dissimulent à l'écholocation des prédateurs, et de nombreux autres exemples restent probablement à découvrir. Outre la furtivité, une autre façon d'échapper aux sonars et aux radars consiste à interférer avec la réception ou le traitement des échos, autrement dit à utiliser des techniques de brouillage. Aux débuts de ces dispositifs de détection, deux organisations en particulier se sont illustrées dans cette guerre électronique : les Skunk Works, de l'entreprise Lockheed Martin, et une organisation internationale à but non lucratif nommée Association of old crows en référence aux équipes radar alliées de la Seconde Guerre mondiale, qui portaient le nom de code Raven, crow et raven signifiant tous deux « corbeau » en anglais). Ces

deux groupes ont développé des contre-mesures électroniques et des « contre-contre-mesures » pour des applications militaires. Les méthodes de brouillage peuvent être soit passives soit actives. Les méthodes passives incluent les leurres, des matériaux (tels de fines bandes d'aluminium ou des fibres de verre métallisées) largués par un appareil afin de masquer sa position précise et ses mouvements aux radars ennemis. Les méthodes actives consistent à envoyer des signaux électroniques pour aveugler ou tromper le radar. Ainsi, les brouilleurs émettent à bruit submergent le récepteur radar de bruit électronique, ce qui complique la détection de l'écho relativement faible de la cible. Les brouilleurs-répéteurs fournissent une copie de l'écho réel, mais dans un délai fictif, ce qui conduit le récepteur à détecter un objet fantôme allant dans la mauvaise direction. Le brouillage actif est à double tranchant, car le brouilleur risque de livrer un signal à un récepteur radar qui n'avait rien détecté.

Les insectes experts en brouillage
De telles techniques pourraient sembler hors de portée des insectes, mais leur course aux armements avec les chauves-souris dure depuis 65 millions d'années, assez longtemps pour que prédateurs et proies développent des mesures et contre-mesures élaborées. Des chercheurs de mon laboratoire ont découvert que les papillons de nuit tigres équatoriens du genre *Bertholdia* (de la famille des Erebiidae) produisent une cacophonie de clics quand ils sont ciblés par une chauve-souris pratiquant l'écholocation. Les insectes détectent les signaux sonar du prédateur en approche grâce à leur appareil auditif sensible aux

hautes fréquences. Ils produisent alors des clics grâce à des morceaux de cuticule striés nommés timbales et situés de part et d'autre du thorax. Chaque timbale présente une trentaine de bandes successives, que l'insecte déforme l'une après l'autre, produisant une succession de clics. La timbale émet une seconde série de clics en reprenant sa forme initiale. La fréquence atteint 4500 clics par seconde. C'est un exemple typique de brouilleur de sonar, dont le principe est identique à celui des brouilleurs de radar. Les timbales sont caractéristiques des papillons du genre *Bertholdia* et de leurs cousins, et leur distribution taxonomique suggère que ces organes représentent une parade ancienne au sonar des chauves-souris.

Mon étudiant Aaron Corcoran a montré que les clics émis par les papillons empêchent les chauves-souris de les attraper, en laboratoire comme sur le terrain. Comment ce brouillage sonore modifie-t-il la perception des chauves-souris ? Certains chercheurs ont suggéré que si les clics du papillon ont des caractéristiques spectrales et temporelles assez semblables à celles des échos que renverraient des proies, les chauves-souris les interpréteraient comme des échos produits

BIBLIOGRAPHIE

V. Conner et A. Corcoran, Sound strategies : The 65-million-year-old battle between bats and insects, *Annual Review of Entomology*, vol. 57, pp. 21-39, 2012.

L. Jakobsen *et al.*, Convergent echolocation beam focusing in echolocating bats, *Nature*, vol. 493, pp. 93-96, 2012.

L. Kloepper *et al.*, Active echolocation beam focusing in the false killer whale, *Pseudorca crassidens*, *Journal of Experimental Biology*, vol. 215, pp. 1306-1312, 2012.

V. Conner, Tiger Moths and Woolly Bears : Behavior, Ecology and Evolution of the *Arctiidae*, Oxford University Press, 2008.

D. Nguyen, La communication chez les dauphins et les baleines, *Dossier Pour la Science*, n° 34, 2002.

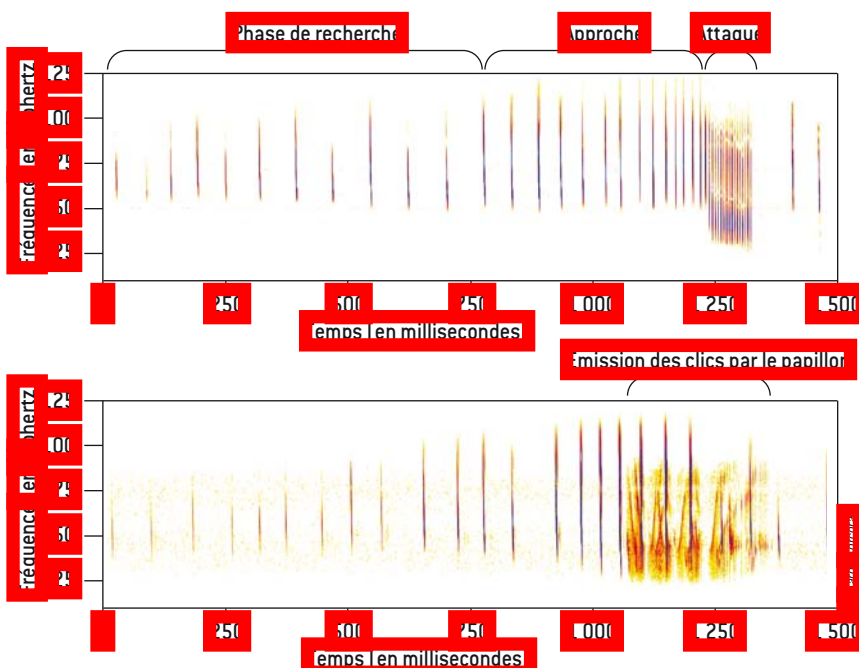
par des « cibles fantômes ». Deuxième hypothèse, des clics assez nombreux et intenses pourraient masquer les véritables échos, rendant la cible invisible. Enfin, des clics qui se superposent aux échos ou les précèdent de peu diminueraient la précision avec laquelle le prédateur détermine la distance de la proie. Les trois hypothèses se distinguent par ce que perçoit la chauve-souris : de multiples objets entourant le papillon pour l'hypothèse des cibles fantômes, aucune cible pour celle du masquage et une cible floue dans le cas d'interférences avec les indications de distance. Les travaux d'A. Corcoran accèdent pour l'instant cette dernière hypothèse, qui prouve de façon fidèle l'écart avec lequel la chauve-souris manque sa proie.

A. Corcoran a aussi montré que les papillons brouilleurs ne produisent leurs signaux que lorsqu'ils sont menacés par une chauve-souris (voir la figure 7). Quand celle-ci a repéré sa proie et se met en chasse, elle augmente l'intensité de ses cris et diminue l'intervalle qui les sépare. Le papillon détecte ces modifications et déclenche alors son brouillage.

Des chauves-sourisfurtives

Les chauves-souris ne sont pas en reste dans la course aux armements : en 2010, Holger Goerlitz et ses collègues de l'Université de Bristol, au Royaume-Uni, ont découvert que certaines d'entre elles sont furtives. Ainsi, les cris d'écholocation de la chauve-souris *Barbastella barbastellus*, qui chasse les insectes en vol, sont 10 à 100 fois moins intenses que ceux de ses consœurs. En conséquence, elle n'est détectée par les papillons dotés d'un système auditif que lorsqu'elle fonce sur eux et que leur sort est déjà scellé.

Ces stratagèmes et contre-stratagèmes constituent ce qu'on nomme une course aux armements diffuse, où de multiples espèces de chauves-souris mènent une lutte évolutionniste contre de multiples espèces de papillons. Les découvertes devraient se multiplier : on compte environ 1 000 espèces de papillons tiges dans le monde et 200 000 autres espèces de papillons de nuit, auxquels s'ajoutent des insectes variés (coléoptères, sauterelles, criquets, mouches, mantes, etc.). Tous doivent se protéger des chauves-souris, le plus redoutable des prédateurs nocturnes.



7. CERTAINS INSECTES BROUILLENT LES SIGNAUX SONAR des chauves-souris en émettant de nombreux clics parasites. Les deux spectrogrammes ci-dessus ont été enregistrés lors d'attaques d'une chauve-souris du genre *Myotis* sur un papillon de nuit entravé. Quand la proie n'émet pas de clics (en haut, cas d'un papillon de la famille des *Noctuidae*), la chauve-souris l'attrape. En revanche, quand le papillon émet des clics (en jaune et rouge sur le spectrogramme du bas, obtenu avec un papillon de l'espèce *Bertholdia triena*), le prédateur manque sa cible.

Alan Gershenfeld

Apprendre grâce aux JEUX VIDÉO

Les jeux vidéo pourraient
transformer l'enseignement.
Divers jeux éducatifs commencent
déjà à apparaître...

En 1993, quand j'ai démarré ma carrière dans les jeux vidéo, le plus célèbre d'entre eux était *Mortal Kombat*. Deux joueurs s'affrontaient jusqu'à ce que l'un d'eux soit étourdi, puis son adversaire lui donnait le coup de grâce. Chaque personnage avait sa méthode: le dénommé Sub-Zero, par exemple, arrachait la tête de son adversaire, avant d'extirper la moelle épinière du corps encore debout. Les parents et les politiciens étaient horrifiés, et un organisme a été créé pour classer les jeux vidéo en fonction de l'âge avec lequel ils sont compatibles.

Nombre de gens pensaient que les jeux vidéo étaient au mieux frivoles, au pire dangereux. Pourtant, ils sont variés et comprennent des jeux d'aventure, de stratégie ou de simulation (qui permettent par exemple de gérer une ville ou d'endosser divers rôles). Ces jeux consistent à explorer,

évaluer, choisir, décider, résoudre. Ainsi, *Spycraft*, un jeu que nous avons développé avec William Colby, ancien directeur de la CIA, et Olga Kalugin, ancien général du KGB, confrontait les joueurs avec des choix éthiques et moraux inspirés d'événements réels de la guerre froide. Dans le jeu *Civilisation: Appel au Pouvoir*, les joueurs devaient prendre des décisions complexes pour construire et conserver un empire en conciliant les progrès culturels, diplomatiques, militaires et scientifiques.

Bien que ces jeux aient eu de nombreux adeptes, leur notoriété était loin de celle des grands jeux d'action. Jusqu'au milieu des années 1990, le public associait les jeux vidéo avec ceux dits de tir en vue subjective, où les joueurs voient l'action du point de vue des personnages; surarmés, ces derniers s'affrontent à mort dans

des environnements tridimensionnels. Après le massacre du lycée américain de Columbine en 1999, on a découvert que les tireurs adoraient les jeux de ce genre, ce qui a conduit encore une fois au dénigrement des jeux vidéo.

Aujourd'hui, les divergences sont plus prononcées que jamais. D'un côté, des conférences, des articles et des livres à succès renforcent l'idée que les jeux et la « ludification » (l'intégration de principes de jeux à des méthodes de résolution de problèmes réels) peuvent sauver la planète. D'un autre côté, les parents cherchent à imiter le temps que leurs enfants consacrent aux activités numériques – environ huit heures par jour en moyenne aux États-Unis – et s'inquiètent de les voir massacrer des humains virtuels à l'artillerie lourde pendant des heures.



L'ESSENTIEL

Les jeux vidéo ont un fort potentiel éducatif et permettent d'exercer certaines capacités, telles que le raisonnement et la collaboration.

Ce potentiel reste à développer. Les industriels doivent s'associer aux éducateurs et aux chercheurs pour concevoir des jeux attrayants en limitant leurs éventuelles influences négatives.



1. LES BLOCS de construction du jeu *qCraft* sont dotés de certaines propriétés étranges, calquées sur celles de la physique quantique.



Pourtant, les jeux vidéo ont un potentiel énorme pour aider à affronter les enjeux éducatifs du XXI^e siècle. L'entreprise que j'ai fondée avec Michael Angst, *E-Line Media*, cherche la façon la plus efficace de les utiliser dans cet objectif, en collaboration avec de multiples organismes, tels que la Fondation américaine pour la science, l'Institution Smithsonian, la fondation Bill & Melinda Gates, *Intel*, *Google*, l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), l'Université de l'Arizona... De nombreux travaux de recherche et développement seront nécessaires.

Dans dix ans, les élèves de CE2 d'aujourd'hui sortiront du lycée dans un monde peuplé de huit milliards d'humains. Ils seront confrontés au changement climatique, à la rareté de l'eau, à l'urbanisation et à d'autres défis. Ils devront être scientifiquement instruits et socialement experts. Il leur faudra comprendre des systèmes complexes, penser de façon critique, proposer des solutions fondées sur des preuves (parfois incomplètes et contradictoires) et se montrer persévérants.

Trop d'abandons à l'école

Trop souvent, ces capacités sont peu développées par le système éducatif et les enfants perdent leur curiosité naturelle. Toutes les neuf secondes, un élève américain abandonne l'école. On estime que cela coûtera dans la prochaine décennie quelque 3000 milliards de dollars (2215 milliards d'euros) en pertes de salaires, de productivité et d'impôts. En outre, 46 pour cent des élèves du collège n'obtiennent aucun diplôme en six ans.

Pour nombre d'enfants, l'éducation traditionnelle n'est donc ni pertinente ni

L'AUTEUR



Alan GERSHENFELD est cofondateur et président de *E-Line Media*, un éditeur de jeux vidéo. Il est

membre de la Fondation pour l'industrie au Centre sur les jeux et leur impact, à l'Université de l'Arizona (États-Unis).

attirante. Les jeux vidéo, en revanche, les captivent. Quelque 97 pour cent des adolescents américains y jouent régulièrement.

Même les jeux qui semblent inquiétants ont parfois des effets neuropsychologiques positifs. Daphné Bavelier, de l'Université de Genève, a montré que leur pratique régulière peut augmenter la plasticité du cerveau et la capacité d'apprentissage, améliorer la vision, optimiser la prise de décision fondée sur des perceptions, aiguïser la capacité de concentration et renforcer la faculté de faire tourner mentalement des objets.

Divers travaux commencent à montrer qu'un jeu bien conçu permet un apprentissage efficace. Ils arrivent à un moment où de nombreux efforts visent à améliorer l'éducation et où les tablettes et les ordinateurs portables se répandent dans les écoles, dont les enseignants n'ont, pour la plupart, pas une idée précise de la façon de les utiliser en classe.

Les jeux diffèrent des médias populaires en ce qu'ils sont interactifs et participatifs. Ils permettent aux joueurs d'endosser des rôles variés (scientifiques, aventuriers, politiciens), de se confronter à des problèmes en avançant à leur propre rythme et d'apprendre à faire face à l'échec dans un environnement sûr. Certains mobilisent la pensée critique, la créativité, la capacité à résoudre des problèmes et le travail d'équipe. Ils pourraient alors servir à repenser le programme scolaire.

La difficulté est qu'un grand fossé sépare le potentiel et la réalité. La plupart des projets d'apprentissage par le jeu peinent à dépasser le stade de la recherche. Pour combler le



2. DES ÉLÈVES DE L'ÉCOLE QUEST TO LEARN [La quête d'apprendre, en français], à New York, jouent à *Gamestar Mechanic*, qui les initie à la conception de jeux. Par cette activité créative, ils s'exercent à de nombreuses compétences figurant au programme du tronc commun.



3. DANS LE JEU *NEVER ALONE (KISIMA INGITTICHUNA)*, une jeune fille Inupiat doit stopper l'Homme Blizzard, une tempête anthropomorphe inspirée des contes traditionnels des indigènes de l'Alaska. À droite, une scène où le sol devient vivant.



ossé, il faudra que les industriels s'associent aux chercheurs et aux éducateurs.

Les jeux peuvent être introduits à l'école de deux façons : en faisant jouer des élèves à des jeux avec des buts précis et qui sont susceptibles d'être terminés (tel un jeu de stratégie où l'on peut gagner), d'une part ; en utilisant des principes liés à la conception de jeux pour restructurer l'apprentissage, d'autre part.

Amorcer l'apprentissage

De nouvelles études renseignent sur ces deux voies. En collaboration avec les créateurs d'un jeu éducatif sur la finance nommé *Celebrity Calamity*, des chercheurs américains ont ainsi montré qu'un jeu peut « amorcer » l'enseignement classique. L'expérience a impliqué deux séquences d'apprentissage : l'une où les étudiants ont d'abord joué au jeu puis ont écouté un cours de finance, et l'autre où l'ordre était inversé. Dans le premier cas, les étudiants maîtrisaient mieux le contexte et étaient plus motivés en assistant au cours.

Les enseignants qui ont joué dans leur enfance excellent à intégrer le jeu en classe. Ainsi, au Texas, deux enseignants ont développé *Historia*, un jeu fondé sur le programme scolaire du collège. Frustrés par le peu d'entrain de leurs élèves pour l'histoire, ils ont créé un jeu sur papier inspiré par le jeu vidéo *Civilisation*. Les élèves devaient travailler en équipe pour diriger les civilisations fictives, en compétition avec les grands empires du passé, qu'elles affrontaient parfois. Ils ont effectué des recherches historiques pour comprendre comment leurs

décisions influeraient sur leur civilisation dans les domaines économique, militaire et culturel. Au début, les parents d'élèves et l'administration ont manifesté une certaine réticence, mais celle-ci a disparu quand les notes à des tests standardisés ont commencé à progresser. Chez *E-Line*, nous élaborons une version numérique d'*Historia*, qui devrait sortir à l'automne 2014.

La conception d'un jeu vidéo requiert aussi de nombreuses compétences – penser de façon tant analytique que globale, expérimenter des théories, créer et collaborer au sein d'une équipe. C'est pourquoi le Laboratoire des médias, au MIT, a créé un langage de programmation nommé Scratch, qui permet aux enfants de développer des jeux dès l'âge de la maternelle. *Microsoft* a lancé un outil similaire, *Kodu*. Et l'on enseigne de plus en plus à l'école la pratique de logiciels et de langages de programmation tels que *Unity*, *Flash* et *Java*, utilisés par les concepteurs de jeux.

Chez *E-Line*, nous avons développé *Gamestar Mechanic*, en collaboration avec la Fondation Mac Arthur et l'Institut du jeu, une organisation à but non lucratif basée à New York. Le jeu est conçu pour des élèves âgés de 8 à 14 ans. Travaillant seuls ou en groupe, ils se connectent depuis un ordinateur et apprennent les rudiments de la conception de jeux en jouant et en réparant des jeux endommagés. Un site communautaire leur permet de diffuser leurs jeux et de collaborer. Ils peuvent critiquer les productions des autres, présenter leurs idées et défendre leurs décisions relatives à la conception de jeux. Depuis le lancement de *Gamestar Mechanic* à l'automne 2010, plus

de 6000 programmes scolaires et périscolaires l'ont utilisé. Cela a donné lieu à plus de 500 000 nouveaux jeux, auxquels des habitants de 100 pays différents ont joué plus de 15 millions de fois.

Certains jeux commerciaux sont aussi déclinés en versions éducatives. *SimCityEdu*, par exemple, a été créé à partir du jeu de simulation *SimCity* (où le joueur doit construire des villes) par un partenariat entre divers instituts et industriels. De même, l'entreprise *Valve* a adapté son jeu *Portal*, où le joueur est lâché dans un laboratoire mystérieux et doit résoudre une série d'énigmes pour survivre. La version éducative est conçue pour faire « de la physique, des maths, de la logique, du raisonnement spatial, des probabilités ».

Sensibiliser aux problématiques sociales

Nous pensons que les jeux éducatifs, du moment qu'ils ne sont pas trop rébarbatifs, peuvent rencontrer une large audience. Il y a eu des précédents avec d'autres médias. Dans l'industrie cinématographique, par exemple, *Participant Media* produit des films supposés « inspirer et accélérer le changement social », tel *Lincoln*, sorti en 2012 et qui traite de l'abolition de l'esclavage aux États-Unis.

Selon nous, les jeux peuvent aussi sensibiliser aux problématiques sociales. Chez *E-Line*, nous collaborons avec *Cook Inlet Tribal Council* (le conseil tribal de Cook Inlet), une organisation d'aide sociale destinée aux autochtones d'Alaska. Ensemble, nous développons un nouveau genre de jeux – le récit culturel par le jeu –, qui met en valeur

l'héritage culturel local. Nous éditerons ainsi un jeu d'action et d'aventure nommé *Never Alone (Kisima Ingittichuna)*, où le joueur contrôlera une jeune fille Inupiat luttant pour sa survie. Dans ce jeu, l'interdépendance, l'adaptation et la résilience apparaissent comme des qualités critiques pour survivre dans des conditions difficiles.

Le meilleur exemple actuel de jeu commercial présentant un potentiel éducatif est *Minecraft*. Développé par le programmeur suédois Markus Persson, le jeu est devenu un phénomène mondial, avec plus de 25 millions de joueurs, surtout des adolescents. Les joueurs errent dans des mondes virtuels, seuls ou en équipe, et réalisent des constructions à partir de blocs, comme dans un jeu de Lego. Une brève présentation des bâtiments de *Minecraft* disponible sur [YouTube](#) révèle des modèles de presque tous les monuments du globe – la tour Eiffel, le Taj Mahal et, mon favori, la Cité interdite de Chine, construite à partir de près de 1,5 millions de blocs.

Introduire à la mécanique quantique

Minecraft est aussi une excellente plateforme pour introduire n'importe quel sujet de façon attractive. Nous avons récemment participé à une collaboration visant à développer *qCraft*, une variante du jeu qui fait pénétrer les joueurs dans le monde étrange de la mécanique quantique. Celle-ci postule que l'observation influe sur le système observé : pour l'illustrer, les blocs de *qCraft* changent de forme et de couleur selon la personne qui les regarde et la direction d'observation. Des blocs « intriqués » sont liés l'un à l'autre (la modification de l'un influe instantanément sur l'état de l'autre), même s'ils sont très éloignés, phénomène que l'on constate réellement avec certains photons, atomes ou molécules. La superposition quantique, où une particule peut se trouver dans deux états à la fois, est aussi illustrée par des blocs particuliers qui peuvent par exemple être « à la fois » en pierre et en bois, et qui sont observés tantôt dans un état et tantôt dans l'autre).

On cherche aujourd'hui à fabriquer des ordinateurs quantiques, qui exploitent ces propriétés étranges. En novembre 2013, Joel Levin, qui a cofondé l'entreprise *TeacherGaming* et participé au développement de *qCraft*, expliquait que ces ordinateurs pourraient se répandre d'ici une ou deux décennies,

BIBLIOGRAPHIE

J. Clark et al., *Digital games or learning : A systematic review and meta-analysis*, IRI International, 2014 (version préliminaire), <http://tinyurl.com/gh2uhot>

L. Begue, *Devient-on tueur grâce aux jeux vidéo ?*, *Cerveau & Psycho*, n° 52, juillet-août 2012.

J.-W. Huang et C.-P. Hsu, *Using online games to teach personal finance concepts*, *American Journal of Business Education*, vol. 4, pp. 33-38, 2011.

J. Bavelier et al., *Children, wired – for better and for worse*, *Neuron*, vol. 67(5), pp. 692-701, 2010.

J. Barab et al., *Situationally embodied curriculum : relating formalisms and contexts*, *Science Education*, vol. 91(5), pp. 750-782, 2007.

arguant que « lorsqu'une jeune personne qui a joué à *qCraft* rencontrera ces concepts difficiles une nouvelle fois, elle en aura une meilleure compréhension intuitive. »

Exploiter le potentiel éducatif des jeux amènera à y traiter la question du bien et du mal. Nombre de parents, d'enseignants et de décideurs montrent de profondes réserves. Leur principale crainte est la violence : jouer à un jeu vidéo violent entraîne-t-il des comportements violents ? Le sujet divise. L'industrie du jeu cite le cas de pays comme le Japon et la Corée du Sud, qui sont de grands consommateurs de jeux violents, mais où les taux de violence armée sont parmi les plus bas du monde. Ils pointent aussi de multiples études montrant l'absence de corrélation entre différents types de comportements (tel celui d'un homme armé qui fait feu dans une école) et la pratique de jeux violents – même si ces travaux indiquent également qu'une telle pratique peut augmenter l'agressivité à court terme. Dans le camp opposé, une série d'études révèlent certains liens entre les jeux et la violence.

Les comportements violents représentent un problème complexe, qui dépend de multiples facteurs environnementaux et biologiques. Des études rigoureuses sur l'impact des jeux dans des contextes variés sont nécessaires, afin de maximiser les bénéfices des jeux et limiter leurs défauts.

Impliquer les parents

De plus en plus de parents s'inquiètent aussi du temps consacré aux jeux par leurs enfants. La consommation numérique de ces derniers doit être équilibrée. Plus les parents sont informés et impliqués, meilleur est le résultat pour l'enfant. En jouant avec lui, ils seront mieux à même de contrôler s'il apprend à programmer ou s'il s'adonne à un jeu violent. On peut aussi imaginer créer des jeux plus brefs ou incorporant des activités réelles, tel un exercice physique suivi avec un accéléromètre.

Durant les prochaines décennies, les progrès de la technologie et du design rendront les jeux vidéo plus réalistes et plus répandus que jamais. Ils envahiront jusqu'aux outils de réalité virtuelle. Les nouvelles techniques renforceront les occasions d'utiliser les jeux pour le bien social, mais intensifieront aussi probablement les inquiétudes. C'est pourquoi il est capital d'accorder dès aujourd'hui aux jeux vidéo l'attention qu'ils méritent.

L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play
et feuillotez gratuitement le numéro en cours.



Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



Scannez ce QR code
avec votre mobile
ou votre tablette
pour télécharger
immédiatement
l'application

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,49 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.



Decouvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver le magazine *Cerveau & Psycho* et son trimestriel *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

Dans l'attente de la prochaine supernova galactique

Paul Lauwardhan

Quand une étoile explose en supernova, beaucoup de neutrinos, particules difficiles à détecter, sont émis. Les astrophysiciens espèrent capter ceux d'une supernova proche pour mieux comprendre la mort des étoiles.

Au petit matin du 24 février 1987, à l'Observatoire de Las Campanas, au Chili, Ian Shelton, astronome de l'Université de Toronto, développait la dernière plaque photographique de la nuit avant d'aller se coucher. Il avait passé la nuit à observer et photographier – avec un temps d'exposition de trois heures – le Grand Nuage de Magellan, une galaxie satellite de la Voie lactée. Alors qu'il retirait la plaque photographique du bain révélateur pour s'assurer que l'image apparaissait correctement, quelque chose attira son regard : un point lumineux anormal à côté de la nébuleuse de la Tarentule, ainsi nommée à cause de sa forme qui évoque une araignée. Était-ce juste un défaut dans la plaque ? Pour s'en assurer, I. Shelton sortit de la coupole qui abrite le télescope afin d'observer à l'œil nu le ciel, limpide dans l'air sec de cette région montagneuse. Dans le Grand Nuage de Magellan, il vit une étoile brillante qui était absente la veille. Il s'empessa de partager sa découverte avec ses collègues dans un autre bâtiment de l'Observatoire.

I. Shelton discutait de l'apparition de cette nouvelle étoile avec les astronomes Barry Madore et William Kunkel lorsque l'ingénieur chilien Oscar Duhalde signala qu'il avait vu l'étoile quelques heures plus tôt, alors qu'il était sorti pour prendre l'air. Tous les quatre parvinrent à la conclusion qu'il s'agissait d'une supernova, un phénomène correspondant à l'explosion d'une étoile, qui peut briller plus qu'un million de soleils durant plusieurs mois. Aucun autre objet astronomique n'était capable de changer aussi rapidement de luminosité : indiscernable la veille, visible à l'œil nu le lendemain. I. Shelton et O. Duhalde avaient ainsi découvert une supernova dans une galaxie satellite de la Voie lactée.

Quelques heures plus tard, le phénomène était observé par un astronome amateur en Nouvelle-Zélande. Avertis les uns après les autres, les astrophysiciens, partout sur la planète, accueillirent avec enthousiasme la découverte, car la « supernova 1987A », comme on l'a nommée, était la première supernova



observée dans le voisinage de la Voie lactée depuis l'invention du télescope, il y a près de quatre siècles.

Les astronomes orientèrent un grand nombre de télescopes optiques de l'hémisphère Sud dans la direction de l'événement qui se déroulait dans le Grand Nuage de Magellan, distant de 163 000 années-lumière. Ils pointèrent aussi des dispositifs sensibles aux infrarouges et aux ondes radio, ainsi que des instruments à bord de sondes spatiales qui enregistrent les rayonnements ultraviolet et X.

Les théoriciens avaient décrit ce type d'explosions grâce à des modèles. À

l'aide de simulations numériques complexes, les chercheurs avaient esquissé comment une étoile massive et vieillissante s'autodétruit: le cœur de l'astre s'effondre pour former soit une boule dense de neutrons – une étoile à neutrons – soit un trou noir, et les couches externes de l'étoile sont expulsées dans le milieu interstellaire, créant un nuage de débris lumineux. L'analyse des observations de la supernova 1987A a confirmé les grandes lignes de ces modèles.

La découverte de la supernova 1987A a éveillé l'intérêt des astronomes, mais aussi celui des physiciens des particules. Ces derniers ont en

L'ESSENTIEL

Lors de l'explosion

Lors d'une étoile en supernova, des photons et des neutrinos sont émis, mais ces derniers sont très difficiles à détecter.

En 1987, une vingtaine

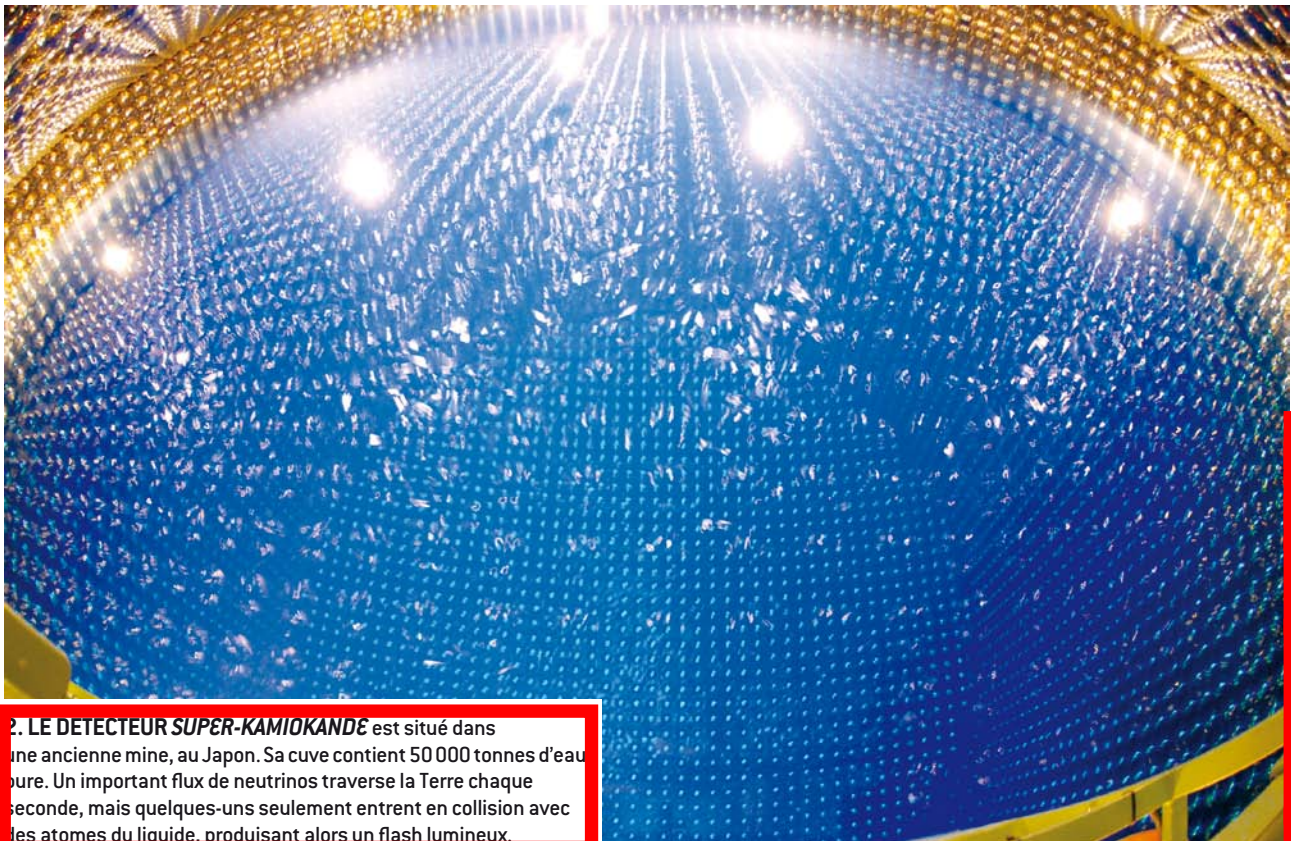
de neutrinos ont été observés en provenance d'une supernova. Ils ont fourni de précieuses informations sur la fin des étoiles et sur la nature des neutrinos.

Les chercheurs guettent

la prochaine supernova qui explosera dans la galaxie. Les nouveaux détecteurs capteront des milliers de neutrinos, riches d'enseignement.



1. L'ÉTOILE MASSIVE ETA CARINAE, distante de 7 500 années-lumière et cachée dans un nuage de poussière (à droite et au centre), explosera un jour en supernova. Les astronomes en ont déjà aperçu les prémices en 1843, lorsque cette étoile s'embrasa brièvement.



2. LE DETECTEUR SUPER-KAMIOKANDE est situé dans une ancienne mine, au Japon. Sa cuve contient 50 000 tonnes d'eau pure. Un important flux de neutrinos traverse la Terre chaque seconde, mais quelques-uns seulement entrent en collision avec les atomes du liquide, produisant alors un flash lumineux.

On a profité de cette explosion pour étudier les neutrinos, des particules souvent qualifiées de fantomatiques, car elles interagissent très peu avec la matière. La supernova 1987A aurait produit quelque 10^{58} neutrinos, émis dans toutes les directions. Une infime fraction d'entre eux sont arrivés sur Terre et seuls une vingtaine ont pu être détectés. Les physiciens ont montré que ces particules sont riches en informations sur la mort des étoiles et la nature des neutrinos.

Les neutrinos arrivent avant la lumière

Si une telle explosion devait survenir dans la Voie lactée – donc beaucoup plus près que la supernova de 1987 –, un plus grand nombre de neutrinos serait détecté. Leur étude permettrait d'affiner les modèles sur la façon dont une supernova se produit. Mais un tel événement est rare au sein de la Voie lactée. Et il peut survenir à tout moment. Les chasseurs de neutrinos se préparent donc à détecter la prochaine explosion. En outre, ils seront peut-être les premiers à repérer l'événement, bien avant que sa lumière n'atteigne la Terre.

À l'annonce de la découverte de la supernova 1987A, John Bahcall (1934-2005), de l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, était excité au point d'en perdre le sommeil. Cette observation allait lui permettre de tester l'une de ses idées : il pensait que des signes avant-coureurs de ce cataclysme cosmique, sous la forme de neutrinos, avaient probablement atteint la Terre plusieurs heures avant que les astronomes ne découvrent la supernova à travers leurs télescopes classiques.

D'après les modèles théoriques de l'évolution stellaire, lorsque le cœur de l'étoile massive s'effondre, une quantité gigantesque de neutrinos est produite. Ils emportent près de 99 pour cent de l'énergie de l'explosion. Ces particules s'échappent alors sans encombre de l'étoile, puisqu'elles interagissent rarement avec la matière. Ce n'est pas le cas des photons, qui peuvent mettre des heures, voire des jours, pour s'échapper. Ainsi, les neutrinos quittent la supernova avec une longueur d'avance sur les photons. Ces derniers ne les rattrapent pas avant d'arriver sur Terre, car les neutrinos se déplacent quasiment à la vitesse de la lumière.

À la suite de l'annonce de la découverte de la supernova, Bahcall et deux de ses collègues ont calculé le nombre de neutrinos provenant de l'explosion que les détecteurs sur Terre auraient enregistrés avant l'observation de l'événement par les télescopes. Ils ont estimé que quelques dizaines de neutrinos devaient être observés. En moins d'une semaine, ils ont soumis leur résultat à une revue scientifique, afin que leur prévision théorique soit publiée avant que les expérimentateurs n'annoncent leurs résultats d'analyse des données des détecteurs.

L'expérience japonaise *Kamiokande* offrait les meilleures chances de voir les neutrinos de la supernova. Son dispositif consistait en une cuve cylindrique de 16 mètres de hauteur, remplie d'eau pure et entourée de 1 000 phototubes – des détecteurs enregistrant le flash de lumière émis lorsqu'un neutrino interagit avec un atome dans la cuve d'eau.

L'analyse de Bahcall mettait à l'épreuve les modèles décrivant les supernovæ et la physique des neutrinos. L'absence totale de neutrinos dans les données aurait conduit à devoir repenser ces modèles. Or le signal des neutrinos était bien visible dans les don-

nées : les détecteurs de *Kamiokande* avaient enregistré 11 flashes en l'espace de quelques secondes, près de trois heures avant la première observation optique de la supernova au Chili et en Nouvelle-Zélande. De l'autre côté de la planète, un détecteur similaire de neutrinos, IMB (pour Irvine-Michigan-Brookhaven), situé dans une mine de sel sous le lac Érié aux États-Unis, avait enregistré huit flashes au même moment que *Kamiokande*. Plus tard, les chercheurs apprirent qu'une troisième expérience, l'Observatoire de neutrinos à Baksan, dans le Caucase russe, avait détecté cinq neutrinos.

La vingtaine de neutrinos enregistrée n'était qu'une fraction des milliards de milliards de neutrinos ayant traversé la Terre pendant un bref instant et émanant de l'étoile qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan. Un si petit nombre de neutrinos ne semble pas spectaculaire, mais il suffisait pour confirmer les calculs de Bahcall. En outre, la supernova 1987A a été la première source astrophysique de neutrinos étudiée en dehors du Soleil et a conduit à de nombreux résultats. John Beacom, physicien théoricien de l'Université de l'Ohio, souligne que ces neutrinos offrent la possibilité d'étudier l'intérieur des étoiles en fin de vie, ce que les astronomes ne peuvent faire avec les télescopes classiques.

Malgré le faible nombre de neutrinos captés, ceux-ci ont permis de confirmer d'importants aspects de la façon dont une étoile explose. Le nombre et l'énergie des particules correspondaient aux prévisions des modèles. Les physiciens ont, par exemple, exclu des scénarios exotiques où la supernova perd de l'énergie en émettant des particules hypothétiques, nommées axions, ou par des fuites dans des dimensions supplémentaires de l'espace-temps. L'arrivée des neutrinos, étalée sur quelques secondes et non simultanée, indique que les particules ont dû s'échapper d'un petit noyau stellaire dense tel qu'il est décrit dans les modèles.

Les mesures ont par ailleurs fourni des indications sur la nature des neutrinos. En arrivant sur Terre trois heures avant les photons captés par les télescopes, les neutrinos ont voyagé à une vitesse proche de celle de la lumière. Les particules légères se déplaçant plus vite que les particules lourdes, une limite supérieure sur la masse des neutrinos a été établie, égale à 12 électronvolts (en unités d'énergie). Cette masse est si faible que les astrophysiciens ont conclu que, malgré la quantité gigantesque

de neutrinos dans l'Univers, ces particules ne peuvent contribuer de façon prépondérante à la « matière noire », une composante importante de l'Univers dont la nature est inconnue. De plus, quand les médias se sont emballés en 2011 à propos d'une mesure qui se révéla plus tard erronée) indiquant des neutrinos plus rapides que la lumière, les neutrinos de la supernova fournirent un contre-argument de poids : si les neutrinos se déplaçaient plus vite que la lumière, ils seraient arrivés sur Terre des années, et non quelques heures, avant les photons.

L'espoir d'une explosion stellaire proche

La supernova 1987A a donné un aperçu de ce que les astrophysiciens peuvent apprendre sur l'intérieur des étoiles mourantes. Alex Friedland, du Laboratoire américain de Los Alamos, explique que si 1 000 neutrinos étaient détectés en provenance d'une supernova, on pourrait alors retracer l'ensemble du processus d'explosion et déterminer le destin de l'étoile. De leur côté, les physiciens des particules pourraient étudier le comportement des neutrinos dans des conditions extrêmes qui ne peuvent être reproduites en laboratoire.

Pour observer un tel flux de neutrinos, les chercheurs doivent être témoins d'une supernova se déroulant au sein de la Voie lactée. Aucune supernova n'a été détectée dans la Galaxie depuis celles de 1572 et de 1604, cette dernière ayant été si brillante qu'elle était visible en plein jour. Les observations des vestiges de ces supernovæ suggèrent qu'elles résultent de l'explosion d'une étoile de type naine blanche qui aurait soit absorbé de grandes quantités de matière d'une étoile compagnon, soit fusionné avec une autre naine blanche.

À partir des observations portant sur d'autres galaxies, les astronomes estiment qu'en moyenne, quelques étoiles devraient exploser par siècle au sein de la Voie lactée. Elles ne seraient pas toujours visibles, car la poussière interstellaire absorbe une partie du rayonnement. En revanche, leurs neutrinos arriveraient sur Terre sans obstacle et n'importe où dans la Voie lactée.

Des détecteurs de neutrinos assez sensibles scrutent le ciel depuis 25 ans. Si les estimations sont correctes, une supernova pourrait survenir bientôt dans la Voie lactée. Il ne faut pas manquer cet événement rare, et les physiciens s'y préparent.

L'AUTEUR



Ray JAYAWARDHANA occupe la chaire de recherche du Canada en astrophysique

observationnelle et est professeur à l'Université de Toronto.

Cet article est adapté de son livre *Neutrinos Hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2013. © Ray Jayawardhana, 2013.

BIBLIOGRAPHIE

M. Hirsch *et al.*, Les neutrinos, messagers de l'inconnu, *Pour la Science*, n° 431, septembre 2013.

V. Hillebrandt, Supernovæ : des explosions énigmatiques, *Pour la Science*, n° 336, octobre 2005.

K. Hirata *et al.*, Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, n° 14, pp. 1490-1493, 1987.

J. N. Bahcall *et al.*, Neutrinos from the recent LMC supernova, *Nature*, vol. 326, pp. 135-136, 1987.

Avec ses collègues, Kate Scholberg, de l'Université Duke, a mis au point le Système d'alerte avancée des supernovæ (SNEWS pour *SuperNova Early Warning System*), un réseau coordonné de détecteurs de neutrinos et d'observatoires qui transmet rapidement un signal quand une explosion d'étoile est repérée dans la Galaxie. Toutes les expériences capables de détecter les neutrinos provenant d'une supernova – telles que IceCube en Antarctique, LVD et Borexino en Italie, et la version améliorée et plus volumineuse de Kamiokande, Super-Kamiokande, au Japon – sont reliées à un centre informatique du Laboratoire américain de Brookhaven. Si plusieurs détecteurs de neutrinos mesurent un signal en même temps, il y a de grandes

chances qu'une supernova ait explosé dans le voisinage galactique.

Si l'intervalle de temps entre les signaux émis par deux détecteurs est inférieur à dix secondes, le système SNEWS transmet une alerte aux autres observatoires dans le monde. K. Scholberg et ses collègues espèrent ainsi que les télescopes terrestres ou spatiaux pourront enregistrer le rayonnement électromagnétique – la lumière visible, les ondes radio ou les rayons X – de la supernova le plus tôt possible, et ainsi suivre les tout premiers instants du processus. Avec un grand nombre de personnes mobilisées pour regarder dans un maximum de directions, les chances d'observer le début de l'explosion augmentent.

Les détecteurs de neutrinos mesureront le nombre de particules, leur énergie et l'évolution de ces grandeurs au cours du temps. À l'aide de ces informations sur le déroulement de l'explosion, les physiciens pourront par exemple déterminer si l'effondrement du cœur de l'étoile forme soit un trou noir, d'où rien – pas même les neutrinos – ne s'échappe, soit une étoile à neutrons. Si un trou noir apparaît, le flux de neutrinos devrait s'interrompre brutalement. Si une étoile à neutrons est le produit final, les résidus de l'étoile continuent d'émettre des neutrinos pendant une dizaine de secondes, le temps que la matière se refroidisse. Le flux de neutrinos décroîtrait progressivement au lieu de s'arrêter d'un coup.

Une supernova galactique fournirait aussi des informations sur les caractéristiques intrinsèques des neutrinos. Par exemple, les physiciens sont confrontés au problème de la « hiérarchie des masses des neutrinos ». Il existe trois types de neutrinos, de masses différentes. Or les expériences actuelles ne permettent pas de mesurer directement ces masses, mais seulement leurs différences. Si l'on veut classer les neutrinos par masse croissante, deux configurations sont possibles (voir l'encadré ci-contre). Les neutrinos d'une supernova permettront de préciser quelle hiérarchie est la bonne.

La hiérarchie des masses des neutrinos

Le modèle standard comprend trois types, ou saveurs, de neutrinos : neutrino électronique (ν_e), neutrino muonique (ν_μ), neutrino tauique (ν_τ). Ces

Mais quelle masse est-ce que ces particules ? Le flux de neutrinos d'une supernova dans la Galaxie apporterait sur cette question des informations précieuses.

Dans les tout premiers instants de la supernova, le flux est dominé par des neutrinos électroniques issus de la conversion des protons en neutrons, lors de la formation de l'étoile à neutrons.

Si les neutrinos avaient une masse nulle, la composition du flux resterait identique. Or les physiciens ont découvert que les neutrinos subissent un processus d'oscillation d'une saveur à

autre, qui n'est possible que si les neutrinos sont dotés d'une masse (qui est très faible).

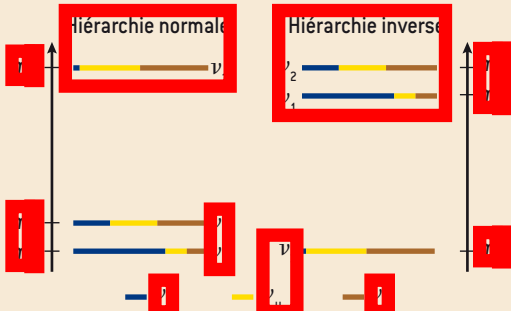
La théorie décrit les neutrinos soit par les trois saveurs, via ce qu'on appelle les états propres d'interaction, soit par trois états propres dits de masse, notés 1, 2, 3, qui sont associés aux masses physiques de ces particules. Un état de masse est une superposition quantique – un mélange – des trois états d'interaction, et inversement.

Des observations ont mis en évidence le phénomène d'oscillation des neutrinos,

confirmant que ceux-ci ont une masse non nulle. Mais ces expériences ne mesurent que les différences des carrés des masses : $7,6 \times 10^{-5}$ électronvolt carré entre les états 1 et 2 ; $2,4 \times 10^{-3}$ électronvolt carré entre les états 2 et 3).

Pour connaître le signe de ces différences, les physiciens profitent du fait que lorsque les neutrinos se propagent dans une matière dense, les probabilités d'oscillations et donc les flux de neutrinos changent. L'observation des neutrinos solaires a permis de déduire que la masse du neutrino ν_2 est supérieure à celle de ν_1 , mais il faut des densités plus élevées (telles que celles qu'on trouve dans une supernova) pour mesurer le signe de la différence avec le neutrino ν_3 , ce qui donnerait la hiérarchie complète parmi les deux possibles (voir la figure), autrement dit, cela précisera si le neutrino électronique contribue surtout à l'état le plus léger (à gauche) ou à un des plus lourds (à droite).

Pasquale Dario Serpico
LAPTH-CNRS

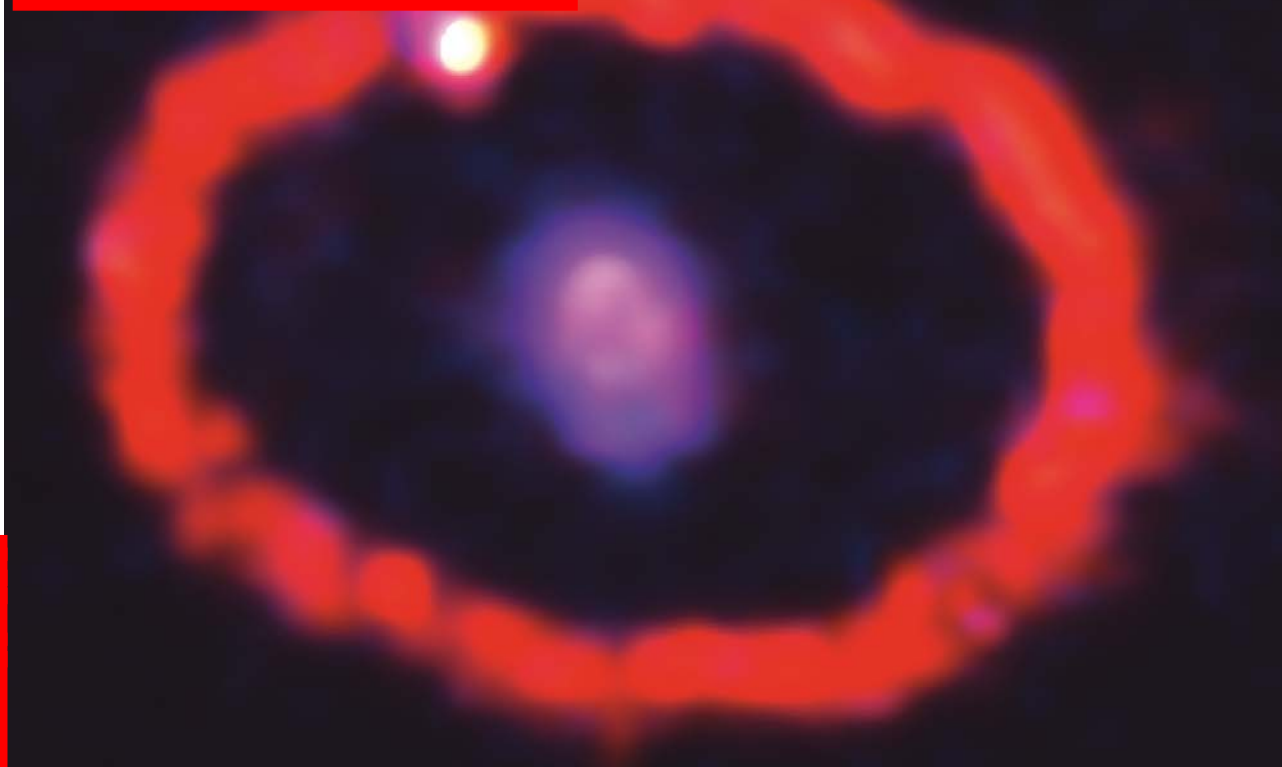


Des neutrinos au comportement exotique ?

Par ailleurs, au cœur d'une supernova, la densité de neutrinos est si élevée que ces particules pourraient interagir, alors qu'elles s'ignorent totalement dans les conditions usuelles. Les neutrinos pourraient alors manifester des comportements exotiques tels que des « oscillations » collectives dont la compréhension est encore incomplète. Les observations pourraient aussi fournir des indices sur ce qui se cache au-delà du modèle standard décrivant les particules élémentaires et leurs interactions.

Parmi les expériences opérationnelles aujourd'hui, Super-Kamiokande pourrait détecter plusieurs milliers de neutrinos provenant d'une supernova explosant au centre de la Galaxie, à environ 25 000 années-lumière de nous. À partir d'un tel flux, les physiciens seront capables d'estimer la direction d'où viennent les neutrinos

3. LA SUPERNOVA 1987A a produit environ 10^{58} neutrinos, dont 24 seulement ont été détectés sur Terre. L'étoile a émis une grande quantité de gaz (l'anneau rouge) 20 000 ans avant d'exploser en supernova. Au milieu des années 1990, une partie de la matière éjectée par la supernova a rattrapé l'anneau (en blanc).



à quelques degrés près, limitant ainsi la zone du ciel à scruter avec les télescopes à une aire à peine plus étendue que celle de la pleine Lune.

L'expérience *IceCube*, qui pourrait enregistrer un million de neutrinos, serait la plus performante pour analyser l'évolution du flux de particules au cours du temps. Francis Halzen, de l'Université du Wisconsin à Madison (États-Unis) et à la tête de l'expérience *IceCube*, précise que le dispositif sera capable de reconstruire l'intégralité du flux d'une durée de dix secondes avec une mesure toutes les quelques millisecondes. Les physiciens pourront ainsi déterminer avec une grande précision le moment où se forme l'étoile à neutrons ou le trou noir.

Cependant, les détecteurs actuels ne sont sensibles qu'à un seul type de particules provenant des supernovæ, l'antineutrino électronique (le neutrino et son antiparticule, l'antineutrino, existent sous trois « saveurs » : électronique, muonique et tauique). L'observation d'un seul type de neutrinos revient à prendre une photographie avec un filtre monochromatique.

L'image composée de toutes les couleurs serait beaucoup plus intéressante. Ainsi, pour enrichir la palette des neutrinos détectables, K. Scholberg et des chercheurs canadiens construisent le dispositif HALO (pour *Helium and Lead Observatory*, Observatoire à l'hélium et au plomb) à SNOLAB dans l'Ontario. Le matériau de détection est constitué de 76 tonnes de plomb, ce qui confère à HALO une sensibilité aux neutrinos électroniques. Comme l'expérience est de taille modeste, seule une supernova dans la moitié la plus proche de la galaxie sera visible.

D'ici quelques années... ou quelques décennies

Les perspectives sont passionnantes, mais elles ne se concrétiseront que lors de l'effondrement d'un cœur stellaire en supernova dans le voisinage galactique.

Le flux de neutrinos en provenance d'une supernova extérieure à la Voie lactée n'apporterait que très peu d'informations. Par exemple, *Super-Kamiokande* ne détec-

terait qu'une poignée de neutrinos d'une supernova née dans la galaxie d'Andromède, la galaxie de taille comparable à la Voie lactée et qui en est la plus proche, à quelque 2,5 millions d'années-lumière.

S'il est certain que des étoiles vieillissantes, telles Bételgeuse ou Eta Carinae, exploseront dans un futur proche, il est impossible d'être plus précis. Dans ce domaine, le « futur proche » peut correspondre à plusieurs centaines de milliers d'années.

Mais la Voie lactée est peuplée d'un très grand nombre d'étoiles et les chances sont grandes que l'une d'elles explose dans les prochaines décennies. A. Friedland ne confiait que s'il devait parier sur ce qui arriverait en premier, une supernova dans la Galaxie ou la construction d'un accélérateur de particules aux États-Unis, il miserait sur l'explosion d'une étoile. Et même si celle-ci est trop éloignée pour que sa lumière nous parvienne, ses neutrinos brilleront intensément dans les détecteurs, un moment qui sera historique pour tous les chercheurs de neutrinos.

Traquer des fossiles au GPS

Robert Anemone et Charles Emerson

Jusqu'à présent, la chance était le principal auxiliaire des prospecteurs de fossiles. Avec la mise au point d'une méthode de recherche des gisements de fossiles par satellite, la géolocalisation pourrait prendre le relais.

1. RECHERCHER DES FOSSILES dans une région aussi vaste que le Great Divide Basin, dans le Wyoming, n'a rien de facile. Mais une nouvelle méthode de prélocalisation des sites fossilifères multiplie les chances de faire des découvertes.

Par une brûlante journée de juillet 2009, quatre véhicules tout-terrain foncent vers le Salt Sage Draw. Le cratère de l'armoise du sel se trouve dans le Great Divide Basin, un désert d'altitude d'où aucune eau ne parvient jamais à la mer. Depuis 1994, le (Robert Anemone) guide des expéditions scientifiques dans le bassin. Paléoanthropologue et paléontologue moi-même, j'emmène cette fois mon équipe vers le Salt Sage Draw à la recherche de fossiles pouvant attester du remplacement des lignées archaïques de mammifères par des lignées modernes pendant l'Éocène (56 à 34 millions d'années).

Malgré mon expérience de ce terrain difficile, je ne reconnais pas la route empruntée les années précédentes. Tout d'un coup, elle disparaît sous les arbrisseaux d'armoise et autres hautes herbes qui peuplent le Great Divide Basin. Hésitant, j'arrête le convoi et pars reconnaître le chemin à pied. Après avoir contourné une petite butte, j'aperçois la route à quelques mètres. C'est

L'ESSENTIEL

Même si les paléontologues se servent de cartes, les découvertes de fossiles sont pour l'essentiel fortuites.

L'identification.

Sur les images prises par satellite, des signatures spectrales particulières des sites fossilifères pourrait aider la prospection paléontologique.

La méthode vient d'être

testée avec succès dans le Great Divide Basin, une dépression du Wyoming, aux États-Unis, où abondent les fossiles éocènes et paléocènes.

à qu'aura lieu la découverte majeure qui transformera notre expédition en un succès scientifique. Son côté fortuit me poussera à rechercher les moyens de réduire le rôle du hasard dans la prospection paléontologique, et à développer avec mon collègue géographe Ch. Emerson la recherche de fossiles à l'aide d'images satellitaires.

Des bancs de grès prometteurs

Ce que je découvre à côté de la route disparue, c'est un banc de grès que je n'aurais sans doute pas vu si nous ne nous étions pas arrêtés. Or je sais bien que dans l'Ouest américain, ce type de sédiment est très souvent fossilifère. Il faut donc que j'en aie le cœur net : je décide de consacrer plusieurs heures à inspecter ces strates avant de reprendre la route. Au bout d'une heure passée à scruter la roche à quatre pattes, mon étudiant Tim Held se met à crier. Lui et son camarade Justin Gish viennent de découvrir

un trésor paléontologique : de très belles mâchoires de mammifères ! Une trouvaille, parce que ce type d'ossements suffit en général pour identifier l'espèce ou du moins le genre d'animal et renseigne aussi sur son alimentation.

La suite ne peut être décrite que comme un rêve de paléontologue : nous avons trouvé près de 500 mâchoires bien préservées et des milliers de dents et autres ossements issus de 20 espèces de mammifères différentes ayant vécu il y a quelque 50 millions d'années. Nous avons nommé le site *Tim's Confession* (la confession de Tim). Ce lieu reste, aujourd'hui encore, le plus riche gisement de fossiles de mammifères du début de l'Éocène non seulement du Great Divide Basin, mais aussi de tout l'Ouest américain.

Mon équipe est loin d'être la première à découvrir des fossiles par accident. L'histoire de la paléontologie est truffée de découvertes aussi heureuses que fortuites. En fait, la façon dont les paléontologues essaient de trouver des fossiles de vertébrés n'a guère changé depuis les premiers jours de la paléontologie. Comme les pionniers du XIX^e siècle, nous continuons à suivre les indices géologiques et topographiques à la recherche de zones sédimentaires propices. Cette préparation topographique mise à part, la découverte de gisements fossilifères est surtout une question de chance. Or, le plus souvent, les chercheurs n'ont pas de chance...

Des prospections moins aléatoires ?

Le caractère fortuit de la découverte de Tim's Confession m'a amené à m'interroger sur le moyen d'améliorer la planification d'une prospection paléontologique. Préalablement à notre expédition dans le Great Divide Basin, nous savions deux choses utiles : d'une part, que les fossiles que nous recherchions se rencontrent dans les grès de 50 à 55 millions d'années ; d'autre part, où ces sédiments affleurent d'une façon favorable à la découverte. Ces deux informations nous ont aidés à réduire la zone de prospection, mais il nous restait des dizaines de kilomètres carrés de terrains gréseux à explorer, avec de grands risques de rentrer bredouilles.

Cette réalité frustrante me tracassait, puis, une nuit au camp, une idée m'est venue. Ce qui l'avait inspirée ? L'atmos-



LES AUTEURS



Robert ANEMONE est paléoanthropologue et paléontologue à l'Université de Caroline du Nord, à Greensboro aux États-Unis.

Charles EMERSON est maître de conférences en géographie à l'Université de l'Ouest du Michigan, aux États-Unis.

phère vierge de toute pollution lumineuse du Great Divide Basin : elle nous donnait souvent l'occasion de regarder passer les points lumineux signalant un satellite dans le ciel.

Je me suis demandé si notre expertise de la topographie et de la géologie paléontologiques du Great Divide Basin pourrait nous servir à planifier nos expéditions sur une image satellitaire des 10000 kilomètres carrés de cette région. Si nous y plaçons les gisements très fossilifères déjà connus, ne suis-je dit, leurs caractéristiques s'y manifesteraient peut-être, alors que sur le terrain, elles sont le plus souvent indétectables. Pourrions-nous ainsi distinguer les zones contenant des fossiles de celles qui n'en contiennent pas ?

Des yeux dans le ciel

L'idée n'était pas vraiment nouvelle : je savais que d'autres paléontologues avaient déjà employé l'imagerie satellitaire pour améliorer l'efficacité de leur quête sur le terrain. Bon connaisseur du registre fossile des primates et des humains anciens, je savais notamment que dans les années 1990, Berhane Asfaw, du Service de recherche de la Vallée du Rift à Addis-Abeba, et ses collègues ont utilisé des images satellitaires pour identifier des affleurements de roches pouvant contenir des fossiles humains anciens en Éthiopie. À la même époque, Richard Stucky, du Musée de la



nature et de la science à Denver, montrant qu'il était possible de reconnaître certains types géologiques de terrain sur des images satellitaires du bassin très fossilifère d'une rivière du centre du Wyoming – la rivière Wind. Au cours de ces deux projets, les paléontologues ont collaboré avec succès avec les experts de la télédétection de la NASA.

Toutefois, je me demandais s'il était possible d'aller plus loin, c'est-à-dire de tirer des images satellitaires assez d'informations pour orienter les recherches sur le terrain avec plus de précision.

C'est pourquoi je me suis tourné vers un géographe, Ch. Emerson. L'idée était de se procurer les images satellitaires libres de droit du Great Divide Basin prises par le système de cartographie *Enhanced Thematic Mapper* (Cartographie thématique améliorée) du satellite *Landsat 7*. Ce capteur mesure le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par une surface de la Terre et le décompose selon huit bandes spectrales (intervalles de longueurs d'onde) du domaine visible et infrarouge. Les signaux correspondants constituent la signature spectrale du point terrestre observé, et permettent de déterminer le type de sol ou de couvert végétal.

L'idée était de développer une identification spectrale fine des sédiments du Great Divide Basin, dans l'espoir que les gisements de fossiles aient une signature spectrale commune ou du moins des caractéristiques spectrales communes.

Si cela s'avérait possible, la perspective d'une meilleure planification de la prospection de zones immenses serait ouverte. Avant de partir en expédition, nous définirions notre parcours sur les écrans de nos ordinateurs. Pour réaliser ce projet, il fallait d'abord mettre au point la méthode, puis la tester en allant prospecter sur le terrain les endroits qu'elle nous aurait conduits à désigner comme prometteurs...

S'orienter dans un paysage multidimensionnel

Pour rechercher la signature spectrale éventuelle de gisements fossilifères, nous disposions des sites ayant produit des découvertes importantes, tel Tim's Confession. Déterminer quelle combinaison des signaux spectraux fournis par *Landsat 7* pouvait caractériser un site fossilifère n'a pas été facile. Il nous a fallu apprendre à nous déplacer dans un paysage multidimensionnel, tâche ardue pour un être humain, mais où les ordinateurs excellent.

Nous avons choisi de rechercher les signatures spectrales à l'aide d'un réseau neuromimétique. Inspiré dans sa structure des réseaux de neurones biologiques, ce type de programme peut, comme un cerveau, être entraîné à reconnaître des

2. EN 2009, LE SITE FOSSILIFÈRE

nommé Tim's Confession a été découvert presque par hasard dans le Great Divide Basin. Il a livré des centaines de rarissimes mâchoires de mammifères bien préservées, vieilles de 50 millions d'années (*ci-dessus*). Depuis, la localisation satellitaire des gisements potentiels de fossiles a multiplié les découvertes de sites intéressants. L'un d'eux, nommé KTK, est proche d'un ancien volcan connu sous le nom de Boar's Tusk (*à gauche*).

motifs dans le paysage. Pour cela, il faut s'exercer en lui fournissant de nombreux exemples de paysages comportant le motif à déceler. Au cours de cet apprentissage, le réseau neuromimétique se modifie petit à petit afin de le reconnaître plus vite et plus sûrement.

Une fois entraîné, notre réseau neuronal s'est révélé capable de reconnaître tous les gisements que nous avions identifiés, par exemple distinguer les surfaces gréseuses d'autres types de terrains, que ce soient des dunes ou des milieux humides. Apparemment, les zones fossilifères avaient bien une signature spectrale commune !

Pour autant, un réseau neuromimétique est aveugle : pure machine numérique, il est incapable d'extraire, des données qu'il traite, les raisons qui lui ont fait prendre sa décision. Il peut distinguer une zone humide d'un gisement fossilifère, mais, à l'inverse, ne peut inférer en quoi les

signatures spectrales de ces deux types de terrains différent, c'est-à-dire nous livrer l'information qui nous serait utile pour affiner notre technique de prospection satellitaire des zones riches en fossiles.

Une autre limite de la recherche par réseaux neuromimétiques est que le traitement numérique des données porte sur des pixels individuels, c'est-à-dire sur les unités élémentaires qui constituent l'image. Un pixel est la contraction de l'anglais *picture element*. Or dans la bande spectrale où ils sont le plus petits, les pixels de Landsat 7 mesurent 15×15 mètres, surface qui peut soit dépasser celle d'un gisement fossilifère, soit lui être inférieure. En raison de cette limite technique, les repérages par réseau neuromimétique des emplacements prometteurs ne coïncident pas toujours avec la réalité de terrain.

Afin de surmonter cet obstacle, il fallait prendre en compte les pixels de signatures

spectrales similaires et adjacents à un pixel prometteur, et pour ce faire reconstituer statistiquement les signatures spectrales globales de zones couvertes par tout un groupe de pixels, qu'il s'agisse d'une forêt ou d'un gisement.

Analyser des pixels de moins d'un mètre

Nous nous sommes ainsi tournés vers une technique dite d'analyse d'image orientée par objet géographique, qui s'appuie sur des images satellitaires en haute résolution disponibles dans le commerce et dont les pixels correspondent à des surfaces de taille inférieure au mètre.

Par cette approche, il devient possible de diviser les images satellitaires en groupes de pixels homogènes sur le plan spectral. Ces groupes sont ensuite caractérisés à l'aide de paramètres physiques tels la brillance

ou les textures moyenne ou médiane, obtenues par des calculs statistiques à partir de la répartition de pixels considérée. La nature de ce qui se trouve au sol peut ainsi être approchée au plus près. C'est par cette approche que nous sommes parvenus à un jeu de critères caractérisant une zone probablement fossilifère.

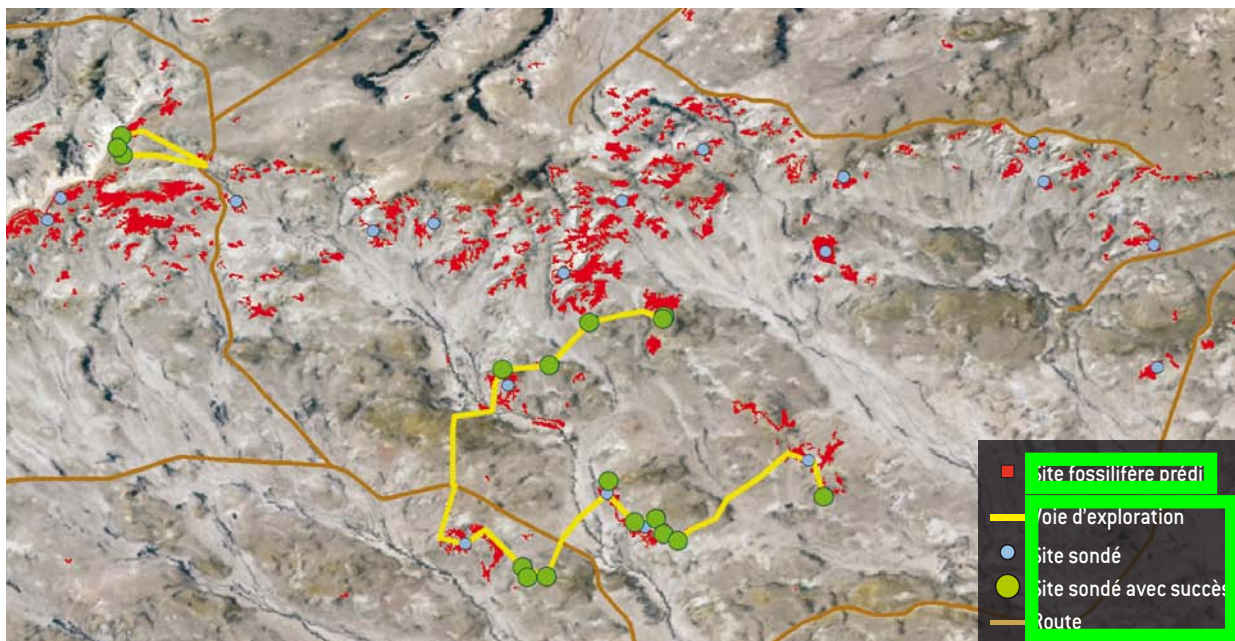
Nous avons ainsi obtenu une carte prédictive des gisements fossilifères potentiels du Great Divide Basin (*voir l'encadré ci-dessous*). Y sont portés tous les endroits présentant une signature spectrale proche de celle des sites fossilifères bien identifiés. Les résultats obtenus par le réseau neuromimétique et ceux de l'analyse d'image orientée par objet géographique concordent souvent, mais divergent aussi dans un certain nombre de cas.

Nous nous sommes concentrés sur les zones déclarées prometteuses par les deux méthodes. Au cours des étés 2012 et 2013,

LES SITES FOSSILIFÈRES POTENTIELS DU GREAT DIVIDE BASIN

Des programmes informatiques de localisation de gisements fossilifères ont été développés pour analyser les signatures spectrales de toutes les zones d'une région et ont subi un apprentissage à partir des signatures spectrales des gisements déjà connus. L'analyse de toute la région a fait apparaître de nombreux endroits présentant les mêmes caractéristiques spectrales (*en rouge*). La carte prédictive obtenue (*ci-dessous*) a servi pour planifier les expéditions de 2012 et de 2013 dans le Great Divide Basin (*en jaune*). Nous avons ainsi pu nous restreindre à seulement quelques régions prometteuses. Nous n'avons pas trouvé de fossiles en chaque endroit sélectionné, mais nous en avons mis au jour bien plus que lorsque nous explorions à l'aveugle. La moisson de fossiles était ainsi bien plus importante que celle de nos précédentes expéditions planifiées sans l'appui d'une carte prédictive.

R. A. et C. E.



nous nous sommes rendus dans le Great Divide Basin notre carte prédictive à la main et remplis d'espoir que nos gisements fossilifères numériques seraient aussi des gisements fossilifères réels.

Le réseau neuromimétique s'est révélé très efficace pour identifier des dépôts de grès, qui contiennent souvent des fossiles de vertébrés. Ainsi, en juillet 2012, l'un des premiers bancs de grès vers lequel il nous a dirigés contenait plus d'une dizaine de fossiles caractéristiques des mammifères de l'Éocène, notamment le cheval à cinq doigts *Hyracotherium*, le primate précoce *Cantius* et plusieurs membres du groupe des Condylarthra, dont les espèces de mammifères ongulés (mammifères à sabots) sont toutes éteintes aujourd'hui. Le réseau neuromimétique nous guida aussi vers plusieurs endroits qui ont livré des fossiles de vertébrés aquatiques, de poissons, de crocodiles et de tortues.

Des fossiles dans 31 des lieux sélectionnés

Notre méthode d'analyse d'image orientée par objet géographique nous a aussi conduits à de nouveaux sites. Après une phase durant laquelle trois ou quatre endroits de notre présélection se sont révélés vides de fossiles, nous avons mis le cap vers Freight Gap (le fossé du chariot), au Nord du Great Divide Basin. Là, nous avons passé une semaine intense à mettre à l'épreuve nos programmes.

Bryan Bommersbach, un des étudiants de notre équipe, nous avait épuisés une semaine auparavant en nous guidant jusqu'à un endroit prometteur, mais qui s'est révélé sans intérêt et que nous avons surnommé la « Folie de Bryan ». Ce fut lui à nouveau qui prit la direction des opérations et sélectionna une série de zones déclarées prometteuses par nos programmes. Heureusement pour lui (et pour nous !), nous avons découvert cette fois des fossiles dans 31 des lieux dont les signatures spectrales étaient proches de celle des gisements déjà connus. Parmi ces sites, 25 contenaient des fossiles de vertébrés et 10 d'entre eux nous ont offert des fossiles de mammifères. Plus extraordinaire encore : un fossile de mammifère datait de la fin du Paléocène (65 à 55,8 millions d'années), ce qui est rarissime.

Ainsi, le taux de réussite de notre chasse aux fossiles d'un nouveau style s'est révélé bien au-dessus de ce à quoi nos prospec-

tions préparées sans carte prédictive nous avaient habitués.

Nous avons toutes les raisons de croire que la même méthode de repérage de gisements de fossiles potentiels fonctionnerait dans d'autres régions que le Great Divide Basin, voire partout dans le monde. En théorie, pour dresser sur un terrain donné une carte prédictive des gisements fossilifères d'un certain type, il suffit de disposer d'images satellitaires et d'assez de lieux de découverte pour entraîner le réseau neuromimétique.

Nous avons ainsi testé ce réseau, entraîné à découvrir des fossiles dans le Great Divide Basin, dans une région voisine : le Bison Basin. Le « bassin du bison » contient lui aussi des fossiles de mammifères du Paléocène et, comme ses formations sont géologiquement similaires à celles du Great Divide Basin, nous pouvions espérer que le réseau ferait preuve d'une certaine efficacité. C'est bien ce qui s'est produit, puisqu'il nous a dirigés vers les trois sites les plus fossilifères du Bison Basin. Clairement, une équipe de paléontologues utilisant notre méthode aurait eu bien plus de chances de découvrir ces sites que si elle était venue pratiquer dans cette région les méthodes classiques de l'exploration paléontologique.

Ainsi, nos campagnes de 2012 et de 2013 dans le Wyoming ont montré que l'utilisation combinée de l'imagerie satellitaire et de programmes prédictifs augmente l'efficacité de la prospection paléontologique. Toutefois, nous voudrions aller plus loin en affinant la caractérisation et la discrimination des signatures spectrales de sites fossilifères. Nous voudrions imposer davantage de contraintes à nos programmes afin de limiter le nombre de faux résultats positifs figurant sur les cartes prédictives obtenues.

Une prospection plus scientifique

Nous sommes convaincus que, grâce à ces outils, la prospection paléontologique peut devenir plus scientifique et plus sûre en limitant les risques de passer à côté d'un fossile important. Cet objectif vaut bien tous les efforts encore à faire pour perfectionner notre méthode. Le registre fossile est très lacunaire. S'en remettre au hasard reviendrait à accepter que 15 ans s'écoulaient entre deux découvertes de l'importance de celle de Tim's Confession!

BIBLIOGRAPHIE

J. W. Emerson et R. L. Anemone, An artificial neural network-based approach to identifying mammalian fossil localities in the Great Divide Basin, Wyoming, *Remote Sensing Letters*, vol. 3, pp. 453-460, 2012.

R. Anemone *et al.*, Finding fossils in new ways: An artificial neural network approach to predicting the location of productive fossil localities, *Evolutionary Anthropology*, vol. 20, pp. 169-180, 2011.

R. L. Anemone *et al.*, GIS and paleoanthropology: Incorporating new approaches from the geospatial sciences in the analysis of primate and human evolution, *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 54, pp. 19-46, 2011.

HISTOIRE DES SCIENCES

Illustration botanique en Chine et en Inde

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, les artistes asiatiques ont insufflé leur talent et leur style aux dessins qu'ils ont réalisés pour le compte de collectionneurs européens.

Martun RIX

Au fil des explorations botaniques qui ont accompagné le colonialisme européen, à la fin du XVII^e siècle et au début du XVIII^e, de nombreux artistes venus de Grande-Bretagne, de France et d'autres pays ont réalisé une multitude d'illustrations et de collections de plantes. On sait moins que des artistes asiatiques ont aussi exécuté des peintures destinées au public européen. Fondée à Londres en 1600 et active jusqu'en 1874, la Compagnie anglaise des Indes orientales

a établi des comptoirs dans toute l'Asie. Ses activités sont centrées sur l'Inde, mais elles incluent aussi la Chine et la Malaisie, entre autres. L'exportation de marchandises de ces régions va de pair avec un intérêt marqué pour la valeur horticole et économique des plantes locales. À la fin du XVIII^e siècle, des naturalistes européens chargent des artistes chinois et indiens de peindre des spécimens. Les œuvres nées de cette collaboration relient à la fois les traditions esthétiques des artistes et l'influence occidentale.

A cette époque, les artistes et jardiniers chinois s'appuient sur des traditions raffinées, tant en matière d'art que d'horticulture. Au XVII^e siècle, sous la dynastie Qing, leurs prédécesseurs avaient abandonné la simplicité des peintures plus anciennes, telles celles réalisées par les empereurs de la dynastie Song (960–1279) : de simples fleurs sauvages et du bambou dessinés avec de l'encre et des pinceaux. Les jardiniers s'étaient spécialisés dans la culture de quelques fleurs sauvages locales et



avaient sélectionné des formes de plus en plus spectaculaires : pivoines, chrysanthèmes, camélias, roses, toutes étaient cultivées en quantité sous des formes doubles, panachées et dentelées, que des peintres immortalisaient avec précision.

Une pivoine chinoise en Europe

Au XVIII^e siècle, les jardins américains, composés d'arbres et d'arbustes issus de semences envoyées par des collectionneurs, font fureur en Angleterre et en France. Cependant, avec l'installation en 1711 du premier comptoir de la Compagnie des Indes orientales en Chine, l'intérêt des jardiniers anglais et français se tourne peu à peu vers l'Est de la Chine. En 1792, la mission diplomatique de George Macartney, mandaté par le roi George III auprès de l'empereur mandchou Chien Lung pour négocier de meilleurs échanges commerciaux, est un échec politique. Néanmoins, en Angleterre, elle intensifie l'engouement pour tout ce qui provient de Chine, y compris les fleurs des jardins.

Les capitaines des bateaux rapides qui apportent le thé en Europe en profitent pour importer des plantes, moyennant finances. Le commerce est lucratif, mais difficile, car les échecs sont nombreux : ces plantes de climat tempéré doivent traverser deux fois l'Équateur et contourner le Cap de Bonne-Espérance pour arriver en Angleterre ou à Amsterdam. Les trois premières pivoines chinoises (des pivoines arbustives de l'espèce *Paonia suffruticosa* ou pivoine moutan) sont introduites en Europe en 1794, et un spécimen en fleur est illustré dans la revue *Curtis's Botanical Magazine* en 1809. En 1820, un camélia *Camellia reticulata* est importé en Angleterre et baptisé du nom du capitaine du navire qui l'a transporté depuis Canton, *Captain Rawes*. Les premiers chrysanthèmes arrivent en France en 1789, apportés à Marseille par un certain capitaine Blanchard. Ils atteignent l'Angleterre six ans plus tard, après leur mise en culture dans les jardins français.

Les gentilhommes jardiniers d'Angleterre, en particulier Sir Joseph Banks, qui dirige les jardins botaniques royaux de Kew et a organisé l'introduction de la pivoine

chinoise], comprennent qu'il serait plus avantageux, pour obtenir des plantes chinoises de façon plus régulière, d'envoyer un jardinier professionnel en Chine. En 1803, un jeune jardinier écossais, William Kerr, part de Kew pour récolter des plantes ornementales chinoises, les préparer au voyage et les envoyer en Angleterre.

Kerr vit à Macao et à Canton pendant environ neuf ans. Il se rend ensuite au Sri Lanka afin d'y créer un jardin botanique, mais il contracte une fièvre peu de temps après son arrivée et meurt en 1814. Selon certains, il aurait auparavant introduit en Grande-Bretagne un rosier blanc grimpant à fleurs doubles nommé *Rosa banksiae*, du nom de Lady Banks (l'épouse de Joseph Banks) et le *Kerria japonica* à doubles fleurs jaunes, nommé en son honneur.

Le 7 mars 1804, un groupe de jardiniers enthousiastes, dont William Forsyth, jardinier de Georges III à Kensington, et William Aiton, qui travaille aux Jardins royaux de Kew, se réunit dans *Hatchards Bookshop*, une grande librairie londonienne, et fonde la Société d'horticulture de Londres (qui



1. LES TROIS AMIS de l'hiver, le pin, le bambou et l'abricotier du Japon, représentés à l'encre par le peintre chinois Zhao Mengjian au début du XIII^e siècle (à gauche). À cette époque, les artistes privilégiaient un style épuré. À droite, une peinture réalisée au XIX^e siècle par un artiste chinois inconnu illustre toute l'attention portée dans l'art visuel chinois aux ramifications des tiges. L'œuvre représente la plante *Lagerstroemia speciosa*.

deviendra la Société royale d'horticulture en 1861). Ce groupe est particulièrement intéressé par les expériences d'hybridation et par l'importation de nouvelles plantes. En 1815, il charge John Reeves, alors inspecteur des thés de la Compagnie des Indes orientales à Canton et déjà un membre actif de la société, de lui expédier des plantes de jardin en provenance de Chine, ainsi que des dessins réalisés par des artistes chinois.

Reeves renvoie un grand nombre de plantes et commande à des artistes chinois des peintures de plantes et d'animaux de toute la Chine, dont il supervise lui-même la réalisation. Aujourd'hui, cinq volumes des peintures de fleurs chinoises qu'il a envoyées à ses commanditaires sont conservés à la bibliothèque Lindley de la Société royale d'horticulture et d'autres encore au *British Museum*.

Ces peintures illustrent surtout des fleurs de jardin : azalées, pivoines, camélias, chrysanthèmes, roses, glycines... Leur style est un mélange d'influences chinoises et européennes, reflet du talent et de la formation des artistes, et de l'impact de la supervision de Reeves. Par exemple, de nombreuses peintures représentent l'angularité des tiges – une caractéristique qui intéresse davantage les Chinois que les Européens. L'influence de Reeves se manifeste notamment dans la variété des vues : sur une même illustration, des dissections de fleurs ou de fruits révèlent des détails botaniques, et un dessin précis de l'avant et de l'arrière des fleurs et des feuilles est souvent proposé.

Parallèlement à ces réalisations, des initiatives pour collecter et répertorier les plantes sont organisées dans d'autres régions d'Asie où la Compagnie des Indes orientales est active. Des peintures similaires sont exécutées sous l'égide de Sir Stamford Raffles, un employé de la Compagnie, fondateur de la ville de Singapour. Raffles est un grand collectionneur de toutes sortes de spécimens d'histoire naturelle. En 1824, il embarque sur un bateau à destination de l'Angleterre avec sa femme, sa collection de

L'AUTEUR

Martyn RIX est botaniste, éditeur de la revue *Curtis's Botanical Magazine*. Il a travaillé comme botaniste pour la Société royale britannique d'horticulture.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.



2. CETTE PEINTURE réalisée par un artiste chinois inconnu représente une ancienne forme cultivée de la pivoine moutan (*Paeonia suffruticosa*). L'image fait partie d'une collection de peintures commandées par John Reeves, membre de la Société d'horticulture de Londres, qui vécut à Canton, en Chine, au début du XIX^e siècle.

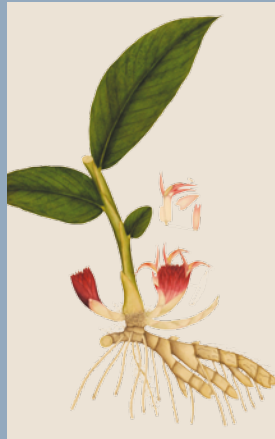
2 000 à 3 000 dessins, d'anciens manuscrits malais et même un tigre apprivoisé. Toutefois, un incendie sur le bateau détruit un grand nombre de ses spécimens, dessins et documents. Rescapé et de retour à Singapour, Raffles engage deux artistes, l'un chinois, l'autre français. En travaillant jour et nuit, les deux hommes parviennent à remplacer un certain nombre de dessins à temps pour qu'ils soient expédiés par le bateau suivant, deux mois plus tard. La collection comporte de nombreux animaux, notamment des faisans exotiques, mais surtout des plantes qui présentent un intérêt économique : des fruits, des herbes médicinales et des plantes utilisées pour la teinture.

Le jardin botanique de Calcutta

Les principales collections proviennent de l'Inde. Malgré l'importance croissante du commerce avec la Chine à la fin du XVIII^e siècle, l'Inde est restée au centre des activités de la Compagnie. Le premier jardin botanique pour l'étude des plantes indiennes d'intérêt économique y a été établi à Calcutta, en 1787.

En 1793, le botaniste écossais William Roxburgh, nommé directeur du jardin, entreprend de constituer un herbier de spécimens séchés et une collection de peintures de plantes indiennes. Les peintures présentent l'avantage d'être moins dévorées par les coléoptères ou les mites. De plus, elles ne souffrent pas de l'humidité et sont plus faciles à transporter que les plantes. Roxburgh commande à des artistes indiens des peintures de plantes de jardin et d'espèces sauvages qu'il récolte.

Plus de 2 000 peintures sont envoyées à Londres, tandis qu'une autre série reste à Calcutta. Deux séries de peintures numérotées identiques permettent aux botanistes en Angleterre et en Inde d'être sûrs qu'ils étudient la même plante. Les peintures envoyées à Londres constituent le fondement d'un splendide ouvrage de Roxburgh, *Plants from the Coast of Coromandel*, publié entre 1798 et 1818.



CES TROIS PEINTURES INDIENNES mêlent le style indien de la peinture miniature (minutie, souci du détail, peu de profondeur) et le souci européen de l'exactitude botanique (coupes et détails représentés à côté, feuilles visibles sur les deux faces). À gauche, une aconit féroce (*Aconitum ferox*), probablement sur une copie d'une peinture réalisée par l'Indien Vishnupersaud (un des rares artistes dont on connaisse le nom) à la demande du Danois Nathaniel Wallich. Au centre, du gingembre (*Zingiber rubens*), ses fleurs et ses rhizomes, peinture commandée par l'Écossais William Roxburgh. À droite, une peinture de la plante *Dombeya wallichii*, nommée d'après Wallich.

Le jardin botanique de Calcutta, tout d'abord sous la direction de Roxburgh, puis sous la supervision du Danois Nathaniel Wallich, devient une étape importante pour les plantes entre la Chine et l'Europe, de même qu'un centre d'étude de la flore indienne à des fins scientifiques. Nommé médecin auprès de la colonie danoise en Inde, Wallich est devenu l'assistant de Roxburgh à 23 ans, avant d'assumer lui-même la direction du jardin de 1817 à 1856. Une grande partie des peintures de sa collection sont publiées dans l'ouvrage *Plantae Asiaticae Rariores* entre 1821 et 1831.

Sur les illustrations produites sous la supervision de Roxburgh et Wallich, en général de grande taille (les plantes sont peintes en taille réelle), chaque détail, chaque poil est représenté. Un tel souci du détail reflète la formation des artistes dans l'art traditionnel indien de la peinture miniature. Dans ce style de peinture, le sujet est en général élégamment positionné de façon à remplir presque toute la feuille. Les détails sont rendus avec soin et précision, mais, contrairement aux peintres européens de l'époque, les artistes indiens se préoccupent moins de créer des

effets tridimensionnels : pour des Européens, leurs spécimens paraissent plats, comme s'ils étaient déjà pressés dans un herbier.

Les plantes plus petites sont montrées avec leurs racines, surtout celles présentant des rhizomes utiles, tels les gingembres. Les plantes offrant un intérêt économique reçoivent une attention particulière, à l'instar de *Derris scandens*, une plante grimpante similaire aux robiniers utilisée comme poison dans certaines techniques de pêche.

Alors que la plupart des peintures exécutées par des artistes indiens ne sont pas signées, les noms de deux artistes qui travaillaient pour Wallich nous sont parvenus : Gorichand et Vishnupersaud. Le travail de ce dernier est particulièrement beau, avec une profondeur peu commune.

En France, bien que le commerce avec l'Inde soit moins soutenu, l'intérêt pour les plantes indiennes et chinoises est tout aussi vif. Passionnée de botanique, l'impératrice Joséphine a fait du pays le centre mondial de l'horticulture. Les domaines de la Malmaison, sa résidence principale, et de Navarre, le château que Napoléon lui a acheté à leur divorce en 1809, accueillent toutes les plantes rares



CETTE PEINTURE de *Enkianthus quinqueflorus* aurait été commandée au début du XIX^e siècle par le jardinier écossais William Kerr, qui vécut à Macao et Canton pendant neuf ans.

BIBLIOGRAPHIE

M. Rix, *The Golden Age of Botanical Art*, Univ. of Chicago Press, 2013

J. Robinson, *William Roxburgh: the Founding Father of Indian Botany*, Phillimore and Co. / Royal Botanic Garden, 2008.

H. Noltie, *Indian Botanical Drawings, 1793-1868*, from the Royal Botanic Garden, Royal Botanic Garden, 1999

apportées des campagnes napoléoniennes, et les nombreux présents que lui font les savants de retour d'expédition. Peu à peu, sous la supervision des botanistes Étienne Ventenat, puis Aimé Bonpland, le jardin de la Malmaison devient incontournable pour les botanistes d'Europe. En 1810, au sommet des guerres napoléoniennes, un arrangement spécial des amirautés britannique et française autorise l'horticulteur anglais John Kennedy à franchir le blocus anglais des ports français pour envoyer à Joséphine diverses plantes, dont le rosier thé chinois *Hume's Blush Tea-Scented China*.

En 1814, Bonpland, qui répertorie les plantes cultivées dans les jardins de Joséphine, se rend à Londres pour y comparer les relevés du peintre de Joséphine, Pierre-Joseph Redouté, aux dessins de la Compagnie des Indes. Il y retrouve la plupart des

plantes chinoises cultivées à la Malmaison et à Navarre. La précision est telle qu'il perçoit même de subtiles différences entre les plantes d'origine et celles cultivées en France depuis plusieurs années, telle la pivoine moutan, arrivée en 1803 à la Malmaison.

Le travail des botanistes, des collectionneurs et des innombrables artistes anonymes de Chine et d'Inde qui ont peint les plantes recensées a contribué à établir de précieuses archives sur les plantes sauvages et cultivées de ces pays. La précision du détail et la fusion des styles artistiques orientaux et occidentaux confèrent à ces images un intérêt historique et archéologique remarquable. De telles collections nous rappellent l'origine de plantes désormais courantes partout dans le monde. Elles nous offrent aussi un plaisir intense : contempler l'art botanique dans sa plus belle expression.

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Savants et inventeurs entre la gloire et l'oubli
Sous la direction de Patrice Bret et Gérard Pajonk

160 pages
11 x 27 cm
10 €



Traité de physique Tome I
Jacques Rohault (1618-1672)

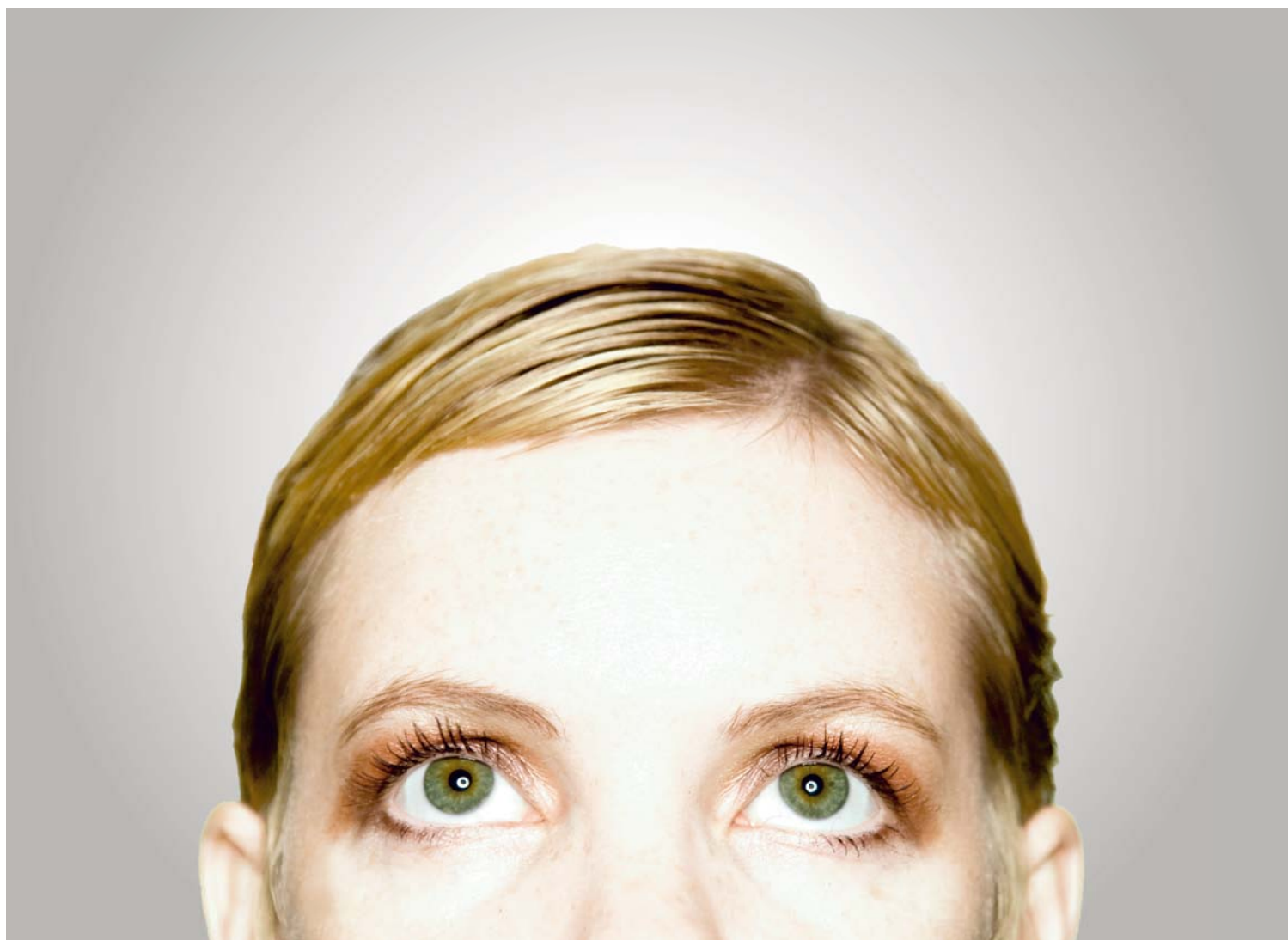
150 pages
15 x 22 cm
11,1 br.
4 €

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

contact@cths.fr

vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr

Distribution Sodi



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées

Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise

Des reportages réguliers sur le thème »Women in Sciences«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

LOGIQUE & CALCUL

Indécidables utiles et inutiles

Les affirmations sur la complexité sont souvent indécidables.
D'où l'idée d'en utiliser comme axiomes pour limiter la désagréable incomplétude de toute théorie mathématique, découverte par Kurt Gödel il y a 80 ans.

Jean-Paul DELAHAYE

Ce qui est simple peut se dire en peu de mots et donc ce qui est complexe en demande beaucoup. Le hasard ne pouvant pas se résumer, il est incompressible et fournit les objets les plus complexes. Ces idées élémentaires servent de fondement à la « théorie algorithmique de l'information » ou théorie de la « complexité de Kolmogorov ». Créée il y a 50 ans par le mathématicien russe Andreï Kolmogorov et quelques autres théoriciens, son importance se confirme d'année en année : on l'utilise en physique pour définir l'entropie, en biologie pour concevoir des algorithmes de comparaison de séquences, en psychologie pour mesurer la capacité des humains à reconnaître et simuler le hasard, etc.

En logique mathématique et en philosophie des sciences, les multiples facettes de cette théorie définissent ce qu'est une suite infinie aléatoire ou une théorie complexe (voir la rubrique du numéro de mai 2013 : « Qu'est-ce qu'un objet complexe ? »). Nous verrons ici que des axiomes portant sur le hasard et la complexité enrichissent une théorie mathématique et augmentent son pouvoir de démonstration. Cinq mathématiciens d'origines variées, Laurent Bienvenu et Antoine Tavenaux, de l'Université Paris 7, Andreï Romashchenko et Alexander Shen, aujourd'hui à l'Université de Montpellier, et Stijn Vemeeren, de l'Université de Leeds en Grande-Bretagne, ont dans un article récent fait avancer notre compréhension du hasard et du rôle logique de la complexité.

I. La complexité ne peut être calculée

La complexité de Kolmogorov d'une suite finie s de 0 et 1 est la taille du plus court programme écrit dans un langage assez puissant qui produit s . On la note $K(s)$. Une suite d'un million de 0 a une faible complexité de Kolmogorov, car il existe des programmes courts qui l'engendrent (par exemple : « Pour i de 1 à 1000 000, print '0' »). C'est vrai aussi de la suite composée d'un million de chiffres de π ou de e , car, grâce aux nombreuses séries qui donnent π ou e , on sait écrire des programmes courts qui calculent un million de chiffres de π ou de e . Il existe un programme de moins de 200 caractères

J. Gibbons, *Amer. Math. Monthly*, vol. 113, pp. 318-328, (2006) qui réussit l'exploit de calculer indéfiniment des chiffres de π . Bien sûr, il les calcule de plus en plus lentement, mais il ne s'arrête que lorsque toute la mémoire de la machine a été utilisée. Il ne s'arrêterait pas si l'on ajoutait progressivement de la mémoire à la machine.

Il est assez facile de montrer qu'il existe des suites s de complexité $K(s)$ aussi grande qu'on le souhaite ; mais Gregory Chaitin a établi que si l'on se donne une théorie formalisée T , elle ne peut démontrer qu'un nombre fini de théorèmes de la forme « $K(s) = n$ » ou « $K(s) > n$ ».

Cela signifie que, sauf pour un nombre fini de suites s , la théorie T ignore tout de la complexité de s : la complexité est, sauf rares exceptions, indécidable. La situation est presque paradoxale : une théorie T (par exemple l'arithmétique de Peano, formalisation la plus naturelle des modes de raisonnements en arithmétique) prouve qu'il existe des suites de grande complexité, mais n'en connaît aucune. Cette forme particulière de incomplétude est remarquable, car contrairement aux formules dont Kurt Gödel a démontré l'indécidabilité, les formules concernant la complexité de Kolmogorov sont immédiatement compréhensibles.



Andreï Kolmogorov



Gregory Chaitin



Giuseppe Peano



Kurt Gödel

Avant d'expliquer le détail de leurs travaux rappelons que la complexité d'un objet numérique (une suite finie s de 0 et de 1) est, d'après Kolmogorov, la taille du plus court programme d'ordinateur qui engendre s . On note cette taille $K(s)$ (elle dépend peu du langage de programmation choisi). Une suite finie s de longueur n est considérée comme aléatoire si elle a une complexité de Kolmogorov proche de sa taille (par exemple supérieure à $n - c$ pour une constante c fixée). Une suite infinie s de 0 et de 1 est considérée aléatoire (on dit aléatoire au sens de Martin-Löf car ce mathématicien est à l'origine de la notion) si c'est le cas de tous les débuts de s : la

suite $\{s_0, s_1, \dots, s_n, \dots\}$ est aléatoire si et seulement s'il existe un nombre c tel que $K(s_0, s_1, \dots, s_n) > n - c$ pour tout entier n .

Comment compléter une théorie ?

Grâce aux célèbres résultats d'incomplétude de Kurt Gödel, nous savons depuis maintenant plus de 80 ans qu'une théorie mathématique formalisée (par exemple la théorie des ensembles) comporte inévitablement des trous : pour toute théorie formalisée T , il existe des énoncés E qualifiés d'indécidables, dont la théorie T n'est capable ni de démontrer qu'ils sont vrais, ni de démontrer

qu'ils sont faux. Parmi ces « indécidables » sur lesquels une théorie T est incapable de se prononcer, figure l'affirmation que dans la théorie T , il n'existe pas de théorème qui énonce le contraire d'un autre. On désigne cette propriété par la « consistance » de T . Une idée vient alors naturellement à l'esprit : pourquoi ne pas ajouter aux axiomes de T l'affirmation de sa consistance, $cons(T)$? On obtient ainsi une théorie plus puissante que T dont on a réduit l'incomplétude.

La théorie de la démonstration – un domaine de la logique mathématique – a étudié ce procédé de complétion qu'on applique éventuellement plusieurs fois : on ajoute l'affirmation de la consistance de T , ce qui donne une nouvelle théorie T' , on recommence avec T' , et ainsi de suite.

Dès 1939, Alan Turing a étudié ce thème qui était le sujet de sa thèse de doctorat à Princeton. Les résultats obtenus sont difficiles, car liés à la théorie des ordinaux (les nombres transfinis). Ils ont été complétés depuis, en particulier par Solomon Feferman, un élève de Gödel.

Ce domaine est malgré tout un peu décevant, car les énoncés qui affirment les propriétés de consistance sont peu pratiques pour démontrer des théorèmes mathématiques, ce qui a pour conséquence qu'il faut en ajouter beaucoup (en fait jusqu'à l'infini, puis recommencer encore et encore en utilisant la théorie des ordinaux) pour que cette méthode de complétion produise des conséquences intéressantes. En résumé, en procédant par l'ajout d'axiomes de consistance, on complète bien les théories mathématiques, mais les théories obtenues ne sont pas très commodes pour ce qui intéresse les mathématiciens et les résultats obtenus délicats à interpréter. Il fallait donc imaginer d'autres méthodes de complétion.

Le mathématicien américain Gregory Chaitin, qui formula en même temps et indépendamment de Kolmogorov la théorie algorithmique de l'information, a suggéré une voie alternative à celle des axiomes de consistance. Il a en effet démontré que les affirmations concernant la complexité de Kolmogorov des suites finies (et donc leur nature aléatoire ou non) sont souvent des indécidables de Gödel. Il a en fait établi le

2. Réduire l'incomplétude en ajoutant des axiomes

La complexité de Kolmogorov, la taille $K(s)$ du plus court programme qui engendre une suite s , est rarement petite. Les programmes sont des suites de 0 et de 1. Chaque programme produit une suite binaire s et certains programmes n'en produisent pas, car ils ne s'arrêtent jamais.

Le nombre de programmes de taille 99 est au plus 2^{99} (il y a 2^{99} suites différentes de 0 et de 1). Le nombre de suites s produites par les programmes de taille 99 est donc inférieur ou égal à 2^{99} . Le même raisonnement montre que les programmes de taille 1, 2, ..., 99 produisent au plus $2^1 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{99}$

suites binaires différentes. La somme de cette série géométrique est égale à $2^{100} - 1$. On en déduit que le nombre de suites s , de longueur 110 par exemple, produites par un programme de longueur inférieur à 100 est au plus 2^{100} . Cela signifie aussi que le nombre (2^{110}) de suites de longueur 110 ayant une complexité $K < 100$ est inférieur à 2^{100} . La proportion de suites de longueur 110 ayant une complexité $K < 100$ est inférieure à $2^{100}/2^{110} = 1/2^{10} = 1/1024$: moins d'une suite sur mille de longueur 110 a une complexité $K < 100$. Plus généralement, la proportion de suites de longueur n ayant une complexité $K < n - m$ est au plus $1/2^m$.

Comme il est facile d'écrire un programme de longueur proche de n qui produit une suite s de longueur n donnée (on prend le programme « PRINT s »), la complexité de Kolmogorov d'une suite de longueur n est, sauf rares exceptions, très proche de n .

Un axiome stipulant qu'une suite s de longueur n tirée au hasard a une complexité $K > n - m$ est très probablement vrai, en même temps qu'il est indécidable, car dès qu'une suite est longue on ne sait déterminer sa complexité de Kolmogorov (voir l'encadré 1).

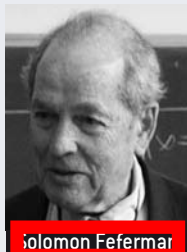
Cette façon d'ajouter comme axiomes des indécidables à une théorie T vient d'être étudiée.



Alan Turing



Per Martin-Löf



Solomon Feferman



Laurent Bienvenu

remarquable et étonnant théorème suivant : une théorie consistante donnée T ne peut démontrer qu'un nombre fini d'affirmations du type « $K[s] = n$ » ou du type « $K[s] > n$ ». Ainsi, au-delà d'un certain n_0 (qui dépend de la théorie T), tous les énoncés affirmant une complexité supérieure à n_0 sont des indécidables de la théorie T .

Éviter les indécidables

Toute théorie formalisée est donc gravement aveugle à la complexité, puisqu'elle ne sait pratiquement rien démontrer de la complexité des suites finies de 0 et de 1. Cela suggère, toujours pour éviter les indécidables, d'ajouter des axiomes de la forme « $K[s] = n$ » ou « $K[s] > n$ » pour des suites finies s et des entiers n choisis. Étudier la force axiomatique de la complexité et du hasard consiste donc à poser les questions « Est-ce que l'ajout de tels indécidables a des effets intéressants ? » et « Comment faire cela au mieux ? ». C'est exactement le sujet de l'article des chercheurs réunis autour de L. Bienvenu.

Insistons sur le fait que ces travaux, aussi abstraits qu'ils paraissent, renforcent notre compréhension philosophique et mathématique sur un sujet fondamental. On doit déjà beaucoup à la théorie algorithmique de l'information dans les progrès faits récemment concernant le hasard, car ce qu'elle montre va au-delà de la théorie des probabilités en établissant, ce qui était loin d'être évident, que les concepts de calculs, d'algorithmes et de programmes sont profondément liés à cette notion.

Les résultats obtenus par L. Bienvenu et ses collègues nous éclairent sur quatre points principaux.

1) Ajouter sans méthode des axiomes affirmant des propriétés presque certaines sur la complexité ne conduit pas à prouver des théorèmes nouveaux limitant l'incomplétude gödelienne, mais en revanche permet de raccourcir les démonstrations.

2) Ajouter comme axiomes des formules indiquant la complexité de séquences assez nombreuses du type « $K[s] = n$ » ou « $K[s] > n$ » supprime les indécidables de la forme « pour tout x : $P[x]$ » (voir l'encadré 3 pour l'importance de telles formules). Cela

constitue un renforcement considérable du pouvoir démonstratif de la théorie. L'affirmation « Tout nombre pair supérieur à 2 est la somme de deux nombres premiers » (conjecture de Goldbach) est de la forme « Pour tout x : $P[x]$ » ; elle ne peut être indécidable dans une théorie complétée systématiquement par des axiomes concernant la complexité.

3) Tous les axiomes du type « $K[s] = n$ » n'ont pas la même force. Certains, assez rares, sont extrêmement puissants et rendent inutiles la plupart des autres.

4) Ajouter comme axiome qu'une séquence infinie s de 0 et de 1 est aléatoire au sens de Martin-Löf renforce la théorie, mais ne le fait jamais autant que la méthode précédente.

Parmi les 2^n suites de 0 et de 1 de longueur n (par exemple $n = 100\,000$), on démontre qu'au plus une sur $1\,024 (= 2^{10})$ a une complexité de Kolmogorov inférieure à $n - 10$ (ici $99\,990$). Il n'y en a, au plus, qu'une sur un million ($1\,048\,576 = 2^{20}$ précisément) ayant une complexité inférieure à $n - 20$ (donc $99\,980$ pour notre exemple). L'énoncé général est : « Au plus une suite de longueur n sur 2^m a une complexité inférieure à $n - m$ » ; autrement dit, les suites peu complexes sont extrêmement rares (voir l'encadré 2).

Si l'on choisit $m = 100$, que l'on tire uniformément une séquence s de $100\,000$ symboles 0 ou 1 (par exemple à l'aide d'une pièce de monnaie) et que l'on ajoute l'axiome « $K[s] > 99\,900$ » à une théorie T , alors sauf malchance extraordinaire (risque de $1/2^{100}$), on ajoute un indécidable vrai à la théorie T à laquelle on s'intéresse. Cela en accroît donc au moins un peu le pouvoir démonstratif : la théorie maintenant sait que $K[s] > 99\,900$.

On dispose ainsi d'une méthode de complétion qui, sauf au plus une fois sur 2^{100} (ce qu'on peut considérer comme totalement négligeable) améliore une théorie T en supprimant au moins un indécidable. La question est maintenant : avoir pris ce risque est-il utile, c'est-à-dire conduit-il à une théorie T comportant un axiome de plus qui démontre des théorèmes nouveaux intéressants, que T était incapable de démontrer avant l'ajout ?

La réponse est négative pour l'essentiel. Cela résulte de la proposition suivante démontrée par le groupe des cinq chercheurs : si l'on

ajoute un ou plusieurs axiomes du type envisagé en les choisissant au hasard (par exemple en tirant à pile ou face les suites s concernées) et en prenant un risque total inférieur à un seuil fixé ϵ (par exemple $1/2^{100}$), et si l'on ne considère que les théorèmes qui dans ce processus probabiliste de démonstration sont obtenus avec une probabilité supérieure à ϵ , alors les théorèmes qu'on découvre peuvent être sans ajout d'axiomes, autrement dit, pouvaient déjà l'être dans la théorie initiale.

Ajouter des axiomes peu risqués est inutile

Ajouter des informations presque certaines concernant la complexité n'est donc pas vraiment utile pour limiter l'incomplétude. En revanche, un second résultat sur ces processus de démonstration avec ajout aléatoire d'axiomes presque certains établit qu'on en tire un gain sur la taille des démonstrations : on n'a pas vraiment plus de théorèmes, mais les théorèmes de T sont maintenant obtenus par des démonstrations plus courtes.

La situation est analogue à celle déjà rencontrée en arithmétique à propos des tests de primalité probabilistes. Alors que démontrer sans accepter de prendre le moindre risque qu'un entier long (de $10\,000$ chiffres par exemple) est un nombre premier exige toujours un long calcul, on sait le faire rapidement si l'on accepte un risque d'erreur, même infinitésimal (par exemple inférieur à $1/2^{100}$). Ces tests probabilistes de primalité découverts dans les années 1980 sont d'une grande utilité en cryptographie.

Mis à part des gains sur la taille des démonstrations, ajouter des axiomes du type « $K[s] = n$ » ou « $K[s] > n$ » lorsque s est aléatoire n'est pas le bon moyen d'accroître le pouvoir de démonstration d'une théorie formalisée T . Qu'en est-il de l'ajout d'axiomes fournissant des informations précises sur la complexité, y compris concernant des suites finies s peu complexes ?

Cette fois, les résultats vont être positifs et très instructifs.

Le premier résultat dans cette direction indique ce que donne l'ajout, à une théorie T , de tous les axiomes concernant la complexité des suites finies : pour chaque suite finie s ,

3. La classification des formules

En logique, on s'intéresse à la forme logique des affirmations mathématiques, ce qui conduit à une classification des formules. Chacun perçoit qu'en parcourant la liste suivante de formules, où chaque élément de la liste est comme un échelon, la difficulté de compréhension des affirmations mathématiques augmente.

Énoncé A: $2 + 11 = 13$.

Énoncé B: Le carré de tout entier pair est aussi pair.

Énoncé C: Pour tout entier n donné, il existe un nombre entier $p > n$ qui est un nombre premier (autrement dit, il y a une infinité de nombres premiers).

Énoncé D: Pour tout entier k , il existe un entier n tel que pour tout entier $m > n$, on ait : $0 < 2^{1/m} - 1 < 1/k$ (autrement dit, la suite $2^{1/m}$ tend vers 1 quand m tend vers l'infini).

Énoncé E: Il existe un entier b et pour tout entier k , il existe un entier n tel que pour tout entier $m > n$: $b - 1/k < f(m) < b + 1/k$ (autrement dit, la suite $f(m)$ a une limite quand m tend vers l'infini et cette limite est un entier).

D'un énoncé au suivant, les formules contiennent de plus en plus de quantificateurs (« il existe », « pour tout ») et c'est ce qui rend leur compréhension plus difficile. Il y en a d'abord 0, puis 1, puis 2, puis 3, puis 4. Cette augmentation de difficulté est utilisée pour définir la hiérarchie arithmétique des formules.

Le premier niveau, noté Δ_0 , ne contient que les affirmations arithmétiques immédiates à vérifier (même si parfois cela demande de la patience). D'autres exemples de formules Δ_0 sont « 1048 576 est

une puissance de 2 », « Il n'y a pas de nombres premiers entre 5 490 et 5 500 ». Pour chacune de ces affirmations, on peut entreprendre un calcul dont on sait évaluer la taille par avance et qui, achevé, indiquera si l'affirmation est vraie ou non.

Toutes les formules de Δ_0 vraies sont démontrables dans le système formel de l'arithmétique de Peano. En particulier, c'est le cas de toutes les affirmations vraies du type « n est un nombre premier ». De même, si une formule de Δ_0 est fausse (par exemple « 121 est un nombre premier »), l'arithmétique de Peano sait démontrer

la négation. Aucune des formules de Δ_0 n'est donc indécidable dans l'arithmétique de Peano (ou dans une théorie plus forte comme la théorie des ensembles).

Au-dessus de Δ_0 , il y a la classe très importante des formules Π_1 . Ce sont les formules de la forme « Pour tout entier n , $F(n)$ », où $F(n)$ est une formule Δ_0 . Au-dessus encore, il y a les formules Π_2 de la forme « Pour tout entier n , il existe un entier m tel que $F(n, m)$ » où $F(n, m)$ est une formule de Δ_0 . Il y a ensuite les

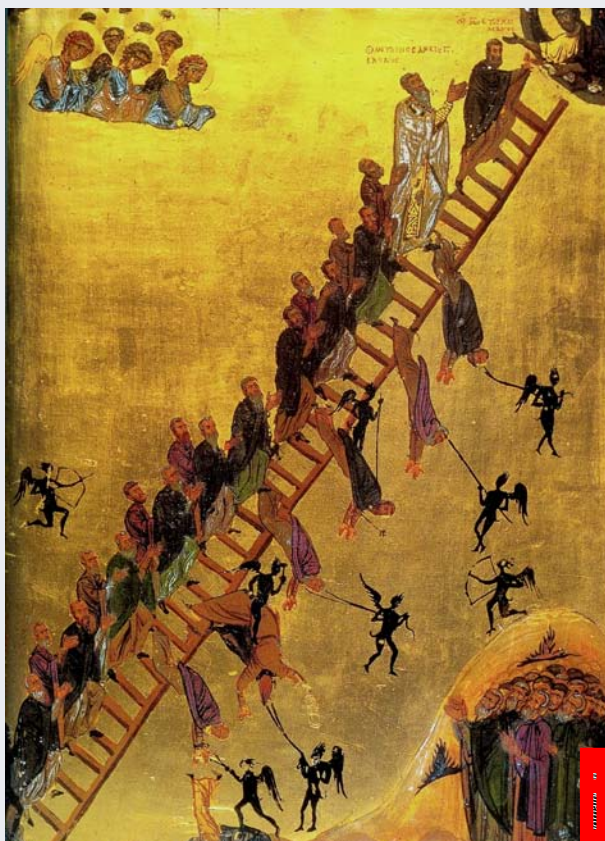
formules Π_3 de la forme « Pour tout entier n , il existe un entier m tel que, pour tout entier k , $F(n, m, k)$ » où $F(n, m, k)$ est une formule de Δ_0 , etc.

La formule « Pour tout entier n , n est multiple d'un nombre premier » est Π_1 , car si n est connu, la formule « n est multiple d'un nombre premier » est Δ_0 . C'est une formule démontrable dans l'arithmétique de Peano.

Parmi les formules Π_1 , certaines sont des indécidables. La formule exprimant que le système formel de l'arithmétique de Peano est consistant (c'est-à-dire non contradictoire) est Π_1 , car elle signifie « Pour tout entier n , les démonstrations dans l'arithmétique de Peano de longueur au plus n ne conduisent jamais à démontrer que $0=1$ ».

De nombreux énoncés sur lesquelles les mathématiciens s'interrogent sont équivalents à des formules Π_1 . C'est le cas de la conjecture de Goldbach (tout nombre pair > 2 est somme de deux nombres premiers), mais aussi de la conjecture de Riemann (une fois correctement traduite). La formule arithmétique qui exprime le théorème des quatre couleurs (toute carte peut être coloriée avec quatre couleurs sans que deux pays voisins portent la même couleur) est aussi une formule Π_1 .

Les énoncés du type « $K(s) \geq n$ » (s et n fixés) sont des formules Π_1 . En effet, une telle affirmation indique qu'aucun programme de longueur inférieure à n ne donne s . À cause des programmes ne s'arrêtant pas, cet énoncé est du type « pour tout n , $F(n)$ ».



« Echelle du paradis », selon la conception du moine Jean Climax (VI^e siècle) : la vie monastique s'échelonne comme sur les 30 barreaux d'une échelle. Les formules mathématiques s'échelonnent, elles, sur une infinité de degrés.

On ajoute l'axiome « $K(s) = n$ » qui donne sa complexité. La nouvelle théorie T' a le pouvoir de démontrer tous les énoncés de la forme «Pour tout x : $F(x)$ » où F est une formule établie par programme (par exemple, « x est un multiple de 7»). Les énoncés de ce type constituent ce qu'on nomme la classe de formules Π_1 , et on montre que la plupart des questions non résolues en mathématiques sont équivalentes à des énoncés de la classe Π_1 .

C'est le cas de la conjecture de Goldbach («Tout nombre pair supérieur à 2 est somme de deux nombres premiers.»); c'est aussi le cas de l'hypothèse de Riemann, qui concerne la répartition des nombres premiers.

Notons bien que l'idée d'ajouter comme axiomes tous les énoncés de la forme « $K(s) = n$ » est étudiée ici comme on étudie ce qui se passe quand deux particules solées interagissent. Il n'existe aucun moyen pratique d'isoler parfaitement deux particules, mais c'est intéressant quand même

de faire le calcul. Ici, il n'existe aucun moyen pratique de connaître la complexité de toutes les suites finies, qui conduirait à ajouter véritablement tous les axiomes envisagés.

On bouche un gros trou grâce à la complexité

Pendant, le résultat de cette expérience de pensée nous apprend quelque chose de profond sur l'indécidabilité: les trous que comporte toute théorie T correspondent quand on se limite aux énoncés Π_1 à un manque d'information sur la complexité. L'indécidabilité de Gödel provient donc de ce qu'une théorie donnée T n'a jamais une assez bonne connaissance de la complexité et qu'il est impossible de mettre toute cette connaissance dans des axiomes simples. En deux mots: l'indécidabilité gödelienne provient de l'ignorance de la complexité.

L. Bienvenu et ses collègues se sont aussi interrogés sur ce que donnerait une informa-

tion partielle sur la complexité, fournie par un nombre limité d'axiomes. Ils montrent que pour qu'une théorie soit capable de démontrer toutes les formules Π_1 de taille au plus n , il suffit d'ajouter un axiome unique de la forme « $K(s) > n$ » pour une suite finie s bien choisie de longueur n . Les suites s utilisables pour cet ajout concentrent en elles l'information nécessaire pour connaître la complexité de toutes les suites de longueur au plus n .

Quand on veut rendre décidables toutes les formules Π_1 , cette façon de procéder est beaucoup plus économique en axiomes que la précédente (qui ajoutait tous les « $K(s) = n$ »). Les cinq chercheurs en déduisent le beau théorème suivant: pour tout entier n , il existe un indécidable dont la taille est approximativement n , qui est une formule Π_1 et qui, ajoutée aux axiomes de l'arithmétique de Peano, supprime tous les indécidables Π_1 de taille inférieure à n . En clair, pour boucher tous les trous correspondant à des formules Π_1 ,

4. Le rôle des formules Π_1

Un théorème central figure dans le travail de Laurent Bienvenu, Andrei Romashchenko, Alexander Shen, Antoine Tzavara et Steffen Vosegaard. Ce théorème indique non seulement que pour une théorie T , connaître la complexité de toutes les séquences finies permet de supprimer tous les indécidables Π_1 et réciproquement; il indique aussi ce qui se passe quand T ne connaît que partiellement ce type d'information.

Le théorème utilise la notion de complexité d'une formule (fondée sur la même idée que la définition de la complexité de Kolmogorov) et il énonce que les trois méthodes suivantes pour compléter une théorie T sont équivalentes:

- Ajouter aux axiomes toutes les formules indiquant la complexité de séquences s qui ont une complexité $K(s)$ inférieure à n .
- Ajouter aux axiomes toutes les formules Π_1 vraies dont la complexité (comme formule) est inférieure à n .
- Ajouter un seul axiome $K(r_n) > n$ pour une séquence r_n dont la construction est



Représentation d'un trou noir. Les indécidables de Gödel sont comme des trous noirs dans les théories.

précisée et qui est donc une séquence concentrant toute l'information jusqu'au niveau n qu'il faut connaître pour supprimer les indécidables Π_1 de complexité inférieure à n .

Un tel théorème, contrairement aux résultats envisageant d'ajouter une infinité d'axiomes pour supprimer tous les indécidables Π_1 , permet d'envisager réellement

une complétion progressive de l'arithmétique de Peano dans le but de supprimer petit à petit les indécidables Π_1 .

Sur Gödel a décliné l'idée qu'il fallait tenter de compléter les axiomes de nos théories pour en limiter l'incomplétude. Ce théorème indique une voie possible et montre qu'il existe des méthodes systématiques pour le faire (au moins pour les formules Π_1).

de taille inférieure à n , un seul axiome supplémentaire assez court suffit.

Les séquences finies s qui permettent ces complétions efficaces sont-elles nombreuses ? La réponse à cette question a été trouvée et, sans surprise, elle est négative : pour compléter efficacement, il faut bien choisir s et c'est difficile, car les s qui conviennent sont en petit nombre.

Un effet limité...

Un autre théorème intéressant généralise le théorème de G. Chaitin mentionné plus haut. Il affirme que, même très efficaces, ces complétions par des axiomes bien choisis n'ont qu'un effet fini, et qu'il faut donc ajouter une infinité d'axiomes pour faire disparaître les indécidables Π_1 . Voici l'énoncé : « Il existe une constante c (qui dépend seulement de la théorie T) telle que, pour tout d fixé, l'ensemble des axiomes vrais de la forme $K[s] > d$ ne peut pas prouver les propriétés de la forme $K[s] > c + d$. »

Autrement dit, la connaissance requise pour savoir quelles suites ont une complexité supérieure à d ne permet pas de savoir quelles suites ont une complexité supérieure à $c + d$: une connaissance « locale » jusqu'à d de la complexité n'est jamais en mesure d'en fournir une connaissance dépassant $c + d$.

La conclusion de cet ensemble de résultats, dont nous n'avons reproduit ici qu'une petite partie, est que, d'une part, l'information sur la complexité des suites finies est bien au cœur de l'indécidabilité (au moins pour les formules Π_1), et que, d'autre part, la force axiomatique d'information sur la complexité est puissante et est susceptible d'une certaine concentration.

La définition des suites infinies aléatoires rappelée au début suggère une idée : trouver une suite infinie aléatoire (au sens de Martin-Löf) unique s et ajouter à T les axiomes indiquant que cette suite particulière est aléatoire. Cet ajout limité correspondant à une affirmation portant sur une unique suite infinie peut-il dire tout ce qui est nécessaire pour que toutes les formules Π_1 deviennent décidables ?

La réponse est négative. Cet objectif ne peut être atteint : aucune suite infinie

aléatoire ne le permet. Cela résulte d'un théorème des cinq chercheurs : l'ensemble d'axiomes affirmant qu'une suite est aléatoire au sens de Martin-Löf n'est jamais suffisant pour supprimer tous les indécidables Π_1 .

Une multitude d'autres résultats affinant notre compréhension de la force axiomatique du hasard sont présentés et démontrés. Précisons qu'à côté de ces résultats de limitation, des résultats expérimentaux d'une équipe réunie autour de Fernando Soler-Ioscano, à laquelle je participe, montrent qu'à condition d'accepter d'effectuer des calculs massifs, une certaine connaissance approchée robuste de la complexité de Kolmogorov est possible et que cette connaissance qui s'applique y compris aux séquences courtes est utile aujourd'hui et sert d'étalon pour mener des expériences en psychologie (voir la bibliographie).

Une méthode automatique d'ajouts progressifs d'axiomes utiles (pour rendre décidables les formules indécidables de Π_1) pourrait s'en déduire pour celui qui dispose d'une capacité de calcul indéfiniment croissante. En utilisant la technique de cette équipe, on obtiendrait pour des suites finies de plus en plus nombreuses des approximations de $K[s]$ qui s'amélioreraient et qu'on ajouterait et modifierait au fur et à mesure du déroulement du calcul.

Des liens devenant précis

Le phénomène de l'incomplétude découvert et démontré par Gödel en 1930 est troublant et toute philosophie des mathématiques (et même des sciences) se doit d'en rendre compte et d'en fournir la compréhension. Les liens établis entre cette incomplétude, la complexité et le hasard que plusieurs résultats de G. Chaitin, Per Martin-Löf et Leonid Levin avaient déjà fait apparaître deviennent maintenant très précis, grâce aux théorèmes établis par l'équipe réunie autour de L. Bienvenu. On sait désormais que ce qui manque dans une théorie formalisée, c'est essentiellement de l'information sur la complexité et le hasard, et on commence à comprendre comment on peut ajouter cette information de façon plus ou moins efficace.

L'AUTEUR



L.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

L. Bienvenu et al., The axiomatic power of Kolmogorov complexity, *Annals of Pure and Applied Logic*, à paraître, 2014 [arxiv.org/pdf/1301.3392.pdf].

F. Soler-Ioscano et al., Calculating Kolmogorov complexity from the output of frequency distributions of small Turing machines, *PLoS ONE*, vol. 9(5), e96223, 2014.

A. Tavenaux, Puissance logique et calculatoire de l'aléa algorithmique, Thèse de doctorat, Université Paris 7, 2013.

S. Vermeeren, Notions and applications of Algorithmic Randomness, Thèse de doctorat, Université de Leeds, 2013.

M. Gauvrit et al., Algorithmic complexity for short binary strings applied to psychology: a primer, *Behavior Research Methods*, en ligne le 6/12/2013 [http://tinu.cc/7ahebx].



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Des vampires pas si imaginaires

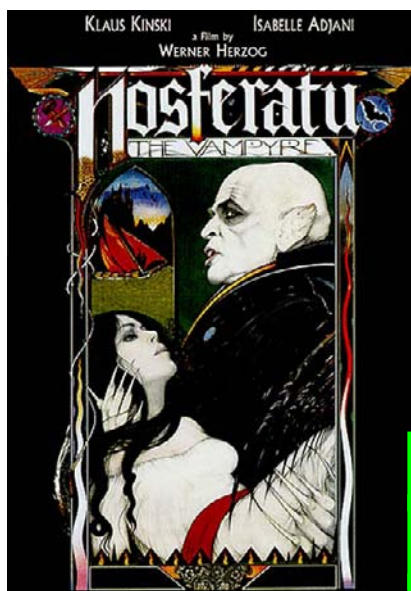
Personnage incontournable de la culture fantastique, le vampire se comporte tel un parasite se nourrissant du sang de ses victimes. Bien réels, les moustiques, les tiques et certaines chauves-souris en font tout autant.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Dracula, Nosferatu, Vlad l'empaleur, Lestat, Carmilla... on a des noms variés, mais ne forment qu'une seule et même entité gothique issue de lointains folklores ou d'anciennes superstitions. Le vampire, *vampyre* en vieux français, *upir* en slave, est un mort-vivant qui se nourrit du sang des vivants et en tire sa force vitale.

Ces êtres ont fait parler d'eux au XVIII^e siècle. La population croyait que ces monstres rôdaient parmi les hommes. En 1751, le moine bénédictin Augustin Calmet a expliqué comment reconnaître un vampire dans son *Traité sur les apparitions*. Il y affirmait qu'un vampire a la peau violacée ou pâle à cause de son penchant pour le sang. Tantôt très pileux tantôt chauve, il peut avoir des oreilles pointues. Dans une vision plus moderne, le vampire arbore un aspect gothique élégant pour mieux attirer ses proies, en majorité de jeunes adolescents. Mais la caractéristique commune demeure les canines longues et pointues, utilisées lors du « baiser ». Notons cependant que, chez le *Nosferatu* de Werner Herzog, interprété par Klaus Kinski, ce sont les incisives qui sont hypertrophiées (comme chez les rongeurs et les lapins !) et non les canines.

Dans les films et les livres, la survie du vampire dépend des humains, alors que la réciproque est fautive : le vampire répond donc à la définition du parasite. Le fait qu'il ne soit pas en permanence en train de s'abreu-



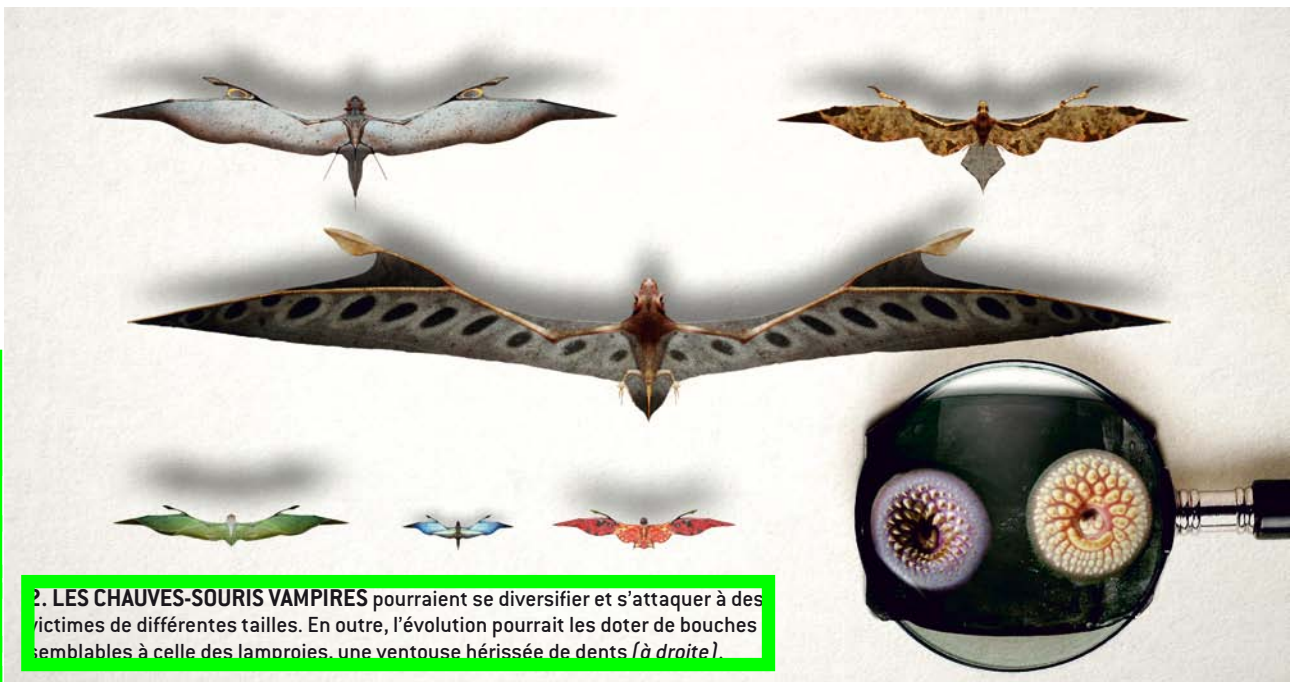
1. DANS LE FILM NOSFERATU (1979)
Le Werner Herzog, Klaus Kinski joue le rôle du comte Dracula qui chasse la nuit, à la recherche d'une victime pour se nourrir de son sang.

ver au cou d'un homme en fait un parasite temporaire. Il existe bien sûr des variantes selon les histoires : certains vampires se compliquent la vie en ne sélectionnant que du sang de jeunes filles vierges (comme c'est le cas du *Nosferatu* de Werner Herzog), tandis que d'autres ne sortent que la nuit. Notons que le *Dracula* de Bram Stoker (1897) arpente les rues de Londres en plein jour. Ces contraintes d'approvisionnement en sang, même si elles ajoutent du piment au scénario, diminuent la probabilité d'une rencontre entre le parasite et sa victime et réduisent d'autant les chances de survie du vampire. Elles illustrent le fait qu'un organisme hyperspécialisé est beaucoup plus fragile qu'un individu généraliste.

Un parasite hématoophage

Autre caractéristique, le vampire est un parasite externe, ou ectoparasite, qui puise le sang de l'extérieur. Ce n'est pas le cas des micro-organismes qui vivent dans le sang de leur hôte : ces endoparasites, tels que le protozoaire *Plasmodium* ou le ver *Onchocerca*, sont responsables de graves maladies – respectivement le paludisme et la « cécité des rivières ». Ils sont véhiculés par des moustiques ou autre suceurs de sang externes.

Dans le monde réel, les hématophages littéralement « mangeurs de sang » ne



2. LES CHAUVES-SOURIS VAMPIRES pourraient se diversifier et s'attaquer à des victimes de différentes tailles. En outre, l'évolution pourrait les doter de bouches semblables à celle des lamproies, une ventouse hérissée de dents (à droite).

sont pas uniquement microscopiques. Comme le sang est une nourriture abondante et riche (en glucose, lipides et protéines contenus dans le plasma), certains animaux en ont fait leur source de nourriture. Ainsi, les « chauves-souris vampires », ou *Desmodontinae*, forment un petit groupe représenté par trois espèces tropicales d'Amérique centrale et du Sud. Elles ne s'attaquent que rarement à l'homme. Grâce à des capteurs infrarouges situés autour du museau, ces chauves-souris repèrent leurs proies à sang chaud – oiseaux ou mammifères – et s'y fixent dès qu'elles sont endormies. Elles les mordent tout en sécrétant un puissant anticoagulant nommé... draculine. Cette protéine – utilisée en médecine et prescrite à des personnes victimes d'un arrêt cardiaque – inhibe la coagulation du sang tout en conservant sa viscosité. La chauve-souris hématophage lape alors la plaie hémophile, parfois jusqu'à ne plus pouvoir redécoller tant elle s'est gavée !

Dans la plupart des histoires, le vampire est vorace. Il saigne sa victime (souvent de sexe opposé pour ajouter une touche d'érotisme) jusqu'à la vider de son sang : il est alors « parasitoïde » et non plus parasite, car il tue son hôte. Certains vampires prennent cependant soin de ne prélever qu'une petite fraction des quatre à cinq litres – sept à huit pour cent de la masse corporelle – fabriqués en permanence par exemple chez une femme de corpulence

moyenne. La victime est alors maintenue en vie afin de pérenniser la relation entre le parasite et son hôte. Notons que les femmes enceintes et les hommes, avec un volume sanguin de six litres en moyenne, devraient être des proies privilégiées...

La rage du vampire

On pourrait aussi imaginer des vampires pacifiques et modernes, profitant des techniques de transfusion sanguine pour se libérer de cette contraignante relation hôte-parasite : ils se promèneraient tranquillement avec leurs poches de sang (une idée que l'on trouve par exemple dans le film *Underworld*, 2003), évitant ainsi de « polluer » leur cheptel. Car le vampire, comme de nombreux hématophages réels, peut aussi infecter sa proie et nombreuses sont les histoires où les mordus deviennent à leur tour vampires : le vampirisme serait contagieux, telle une maladie transmise par le sang.

D'ailleurs, certaines affections passaient autrefois pour du vampirisme. C'était le cas de la tuberculose, où les malades ont parfois du sang sur les lèvres ou de la porphyrie qui s'accompagne d'une destruction de l'épiderme exposé à la lumière, d'une coloration en rouge des dents et des ongles, et d'une allergie à l'aillicine (un composé de l'ail), autant de caractéristiques d'un vampire.

Pour certains historiens, les épidémies de rage en Europe de l'Est ont précédé les

premiers récits de vampires. En effet, certains signes de la rage – agressivité, hypersensibilité à la lumière – ont souvent été associés aux vampires. En outre, Nosferatu proviendrait du grec *nosophoros* signifiant « porteur de contagion ». Le vampire est donc aussi un fléau, vecteur de maladies, autrement dit un « infecté », un banni ou un maudit, de la même façon que le moustique anophèle transmet le paludisme en piquant sa victime.

Et les dents des vampires ? Elles sont peut-être dotées d'un sillon en surface ou même d'un canal central qui, à l'instar des seringues ou des crochets venimeux de serpents ou de chélicérates (scorpions, araignées, etc.), leur permettrait d'aspirer le sang.

Les hématophages ont aussi développé des instruments adaptés : le moustique pique avec une trompe qui est un élément hyperallongé du labium (ou « lèvres »), tandis que la lamproie (*Petromyzon*) dispose, en plus d'une langue râpeuse, d'un disque buccal composé d'une multitude de dents acérées, qui fait ventouse sur la proie. On retrouve ces dernières caractéristiques chez les « Reapers », des vampires imaginés par Guillermo del Toro dans son film *Blade II*. Ainsi, nous côtoyons, parfois sans le savoir, de multiples vampires. Tentons un mauvais jeu de mots : ne perdons pas notre sang-froid !

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Des ferrofluides pour des œuvres de pointe

Les liquides ferromagnétiques sont des suspensions de petits aimants. Soumis à un champ magnétique, ils se hérissent de pointes. Certains artistes en font des sculptures mouvantes.

Loïc MANGIN

Quel est le point commun entre un billet de un dollar, les disques durs, l'imagerie par résonance magnétique et un amortisseur de voiture ? Tous utilisent les propriétés des fluides ferromagnétiques, c'est-à-dire des liquides qui contiennent des particules de taille nanométrique en suspension et dotées de propriétés magnétiques. Nous reviendrons en détail sur leur composition.

Les ingénieurs ne sont pas les seuls à exploiter les comportements étonnants de ces substances. Plusieurs artistes en ont également fait leur matière première. Parmi eux, citons l'Allemand Martin Frey, le groupe australien *Pendulum*, le Suisse Fabien Oefner... et la Japonaise Sachiko Kodama, dont plusieurs œuvres sont représentées ici (*Protrude, Flow en a, c et d; Morpho Tower en b*). En 2014, elle a exposé à l'Université Stony Brook, aux États-Unis, et au Musée d'art contemporain de Shanghai (*Power station of art*), en Chine.

Les ferrofluides ont été inventés dans les années 1960 par Stephen Papell, un ingénieur de la NASA qui souhaitait, dans le cadre du programme *Apollo*, fabriquer un carburant pour fusées. Pour ce faire, il mélangea de la poudre de magnétite (un oxyde de fer, Fe_3O_4) à du kérosène et à de l'acide oléique puis broya l'ensemble pendant dix mois ! Il obtint le premier ferrofluide.

Aujourd'hui, la plupart des liquides ferromagnétiques sont toujours élaborés avec de

la magnétite, même si on lui préfère parfois la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) qui est une forme oxydée de la magnétite. Étonnamment, ces deux substances, présentes dans les cellules nerveuses des pigeons, seraient la clef du sens de l'orientation de ces oiseaux !

Quel est le rôle de l'acide oléique ? Le lipide joue le rôle de tensioactif qui permet à la magnétite de rester en suspension dans le liquide. Sans lui, le ferrofluide ne serait pas stable et les nanoparticules magnétiques (de 5 à 15 nanomètres de diamètre) sédimenteraient. Les parties hydrophiles du lipide s'associent avec les particules

Les pics apparaissent quand le champ magnétique est suffisamment fort pour vaincre la tension de surface du fluide et la gravité

alors que les parties hydrophobes sont en contact avec le solvant : les particules restent en suspension grâce au mouvement brownien. L'acide oléique est toujours utilisé lorsque le solvant n'est pas polaire. Dans le cas contraire, on doit privilégier, par exemple, une solution d'acide nitrique pour charger électriquement les particules, de façon à ce qu'elles se repoussent.

En l'absence de champ magnétique, l'aimantation de chaque nanoparticule est orientée au hasard, ce qui conduit à une aimantation globale nulle. En revanche, en présence d'un champ magnétique extérieur,

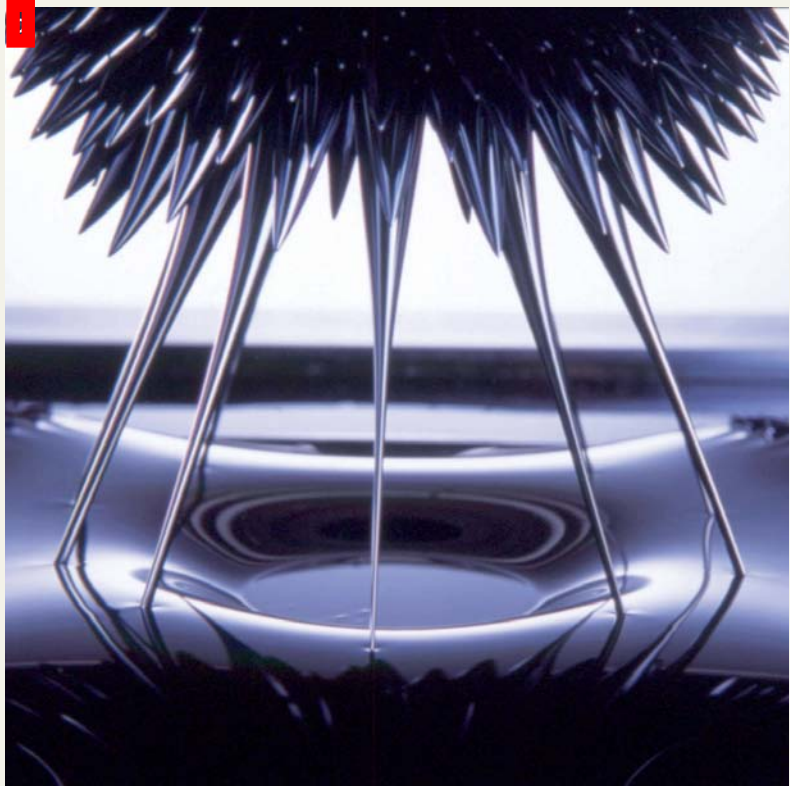
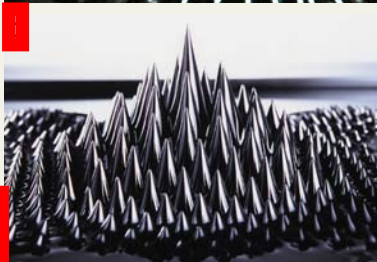
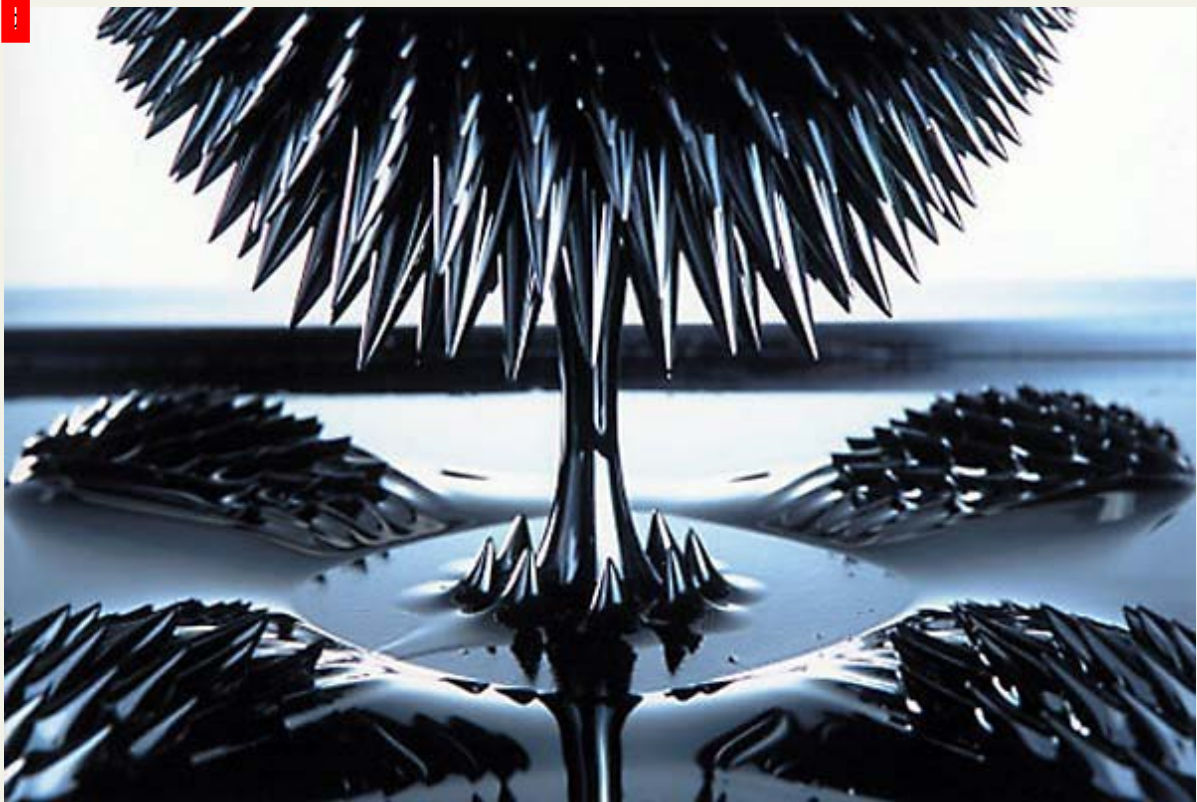
l'aimantation des nanoparticules s'oriente, en moyenne, dans le sens du champ, bien que l'aimantation de chaque particule puisse basculer aléatoirement sous l'effet de l'agitation thermique.

Les pics observés apparaissent spontanément quand le champ magnétique, fourni par des électro-aimants, est suffisamment intense pour vaincre la tension de surface du liquide et la gravité. Ces pointes suivent les lignes du champ appliqué et leur forme, notamment la hauteur, dépend des paramètres du champ.

Dans *Protrude, Flow*, la première œuvre de S. Kodama (2001) fondée sur les ferrofluides, six électro-aimants étaient installés autour du récipient contenant le ferrofluide, mais l'encombrement réduisait la visibilité. Aussi, pour pallier cet inconvénient, dans *Morpho Tower* (2006), un électro-aimant unique est façonné en une sorte de tour conique spiralée autour de laquelle s'enroule puis se hérisse le ferrofluide à mesure que le champ magnétique s'intensifie.

Dans certaines de ses œuvres, l'artiste a ajouté un dispositif qui modifie le champ magnétique selon l'environnement, tels les sons, de façon à obtenir des sculptures mouvantes et dynamiques.

S. Kodama, *Dynamic ferrofluid sculpture: Organic shape-changing art forms*, *Commun. of the ACM*, vol. 51(6), pp. 79-81, 2008. Une vidéo de *Protrude, Flow*: <http://bit.ly/1xau7JN>



IDÉES DE PHYSIQUE

Du soleil pour chauffer... et refroidir

En jouant sur les différences de densité entre les régions chaudes et froides, on peut créer une circulation au sein d'un fluide et un transfert de chaleur. Des chauffe-eaux et des climatiseurs solaires fonctionnent sur ce principe.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment disposer d'eau chaude dans son habitation tout en se passant d'électricité ? Chauffer l'eau avec des capteurs solaires n'est pas tout ; encore faut-il assurer la circulation de l'eau dans ces capteurs pour les alimenter en eau froide et acheminer l'eau chaude dans le réservoir qui la stockera jusqu'à son utilisation.

La solution ? Réaliser un thermosiphon, c'est-à-dire provoquer une circulation grâce à la différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide, différence responsable de mouvements dits de convection. En adaptant ce principe à la circulation de l'air, il est aussi possible d'utiliser la chaleur du soleil pour, paradoxalement, rafraîchir une maison en plein été.

La convection thermique en guise de moteur

Comment fonctionnent ces dispositifs, qui n'ont pas besoin de pompes ? Commençons par le phénomène de convection. Lorsqu'on place une casserole d'eau sur un feu ou une plaque chauffante, on peut voir que l'eau se met en mouvement bien avant que l'ébullition ne débute (voir la figure 1). Cette convection a pour origine les écarts de température au sein du liquide, qui créent les différences de masse volumique.

La masse d'un litre d'eau est de un kilogramme à 4°C sous pression atmosphérique. Mais ce n'est plus le cas à d'autres

températures. Plus la température est élevée, plus les molécules d'eau s'agitent et brisent les liaisons intermoléculaires qui confèrent au liquide sa cohésion, de sorte que l'eau se dilate : la masse d'eau contenue dans un litre diminue. À 20°C, cette diminution est minime – un peu moins de deux grammes. Mais à 50°C, la différence atteint déjà 12 grammes, et à 100°C elle est de 42 grammes. Un litre d'eau fait alors 958 grammes, et la différence est notable.

Pour en revenir à la casserole chauffée, l'eau au-dessus du feu s'échauffe plus vite que l'eau située à la périphérie du récipient. La colonne d'eau au centre est donc moins

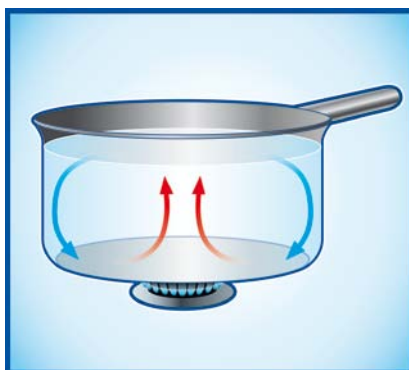
dense et exerce au fond de la casserole une pression inférieure à celle de la colonne d'eau périphérique.

Cette différence de pression amorce un mouvement d'ensemble du fluide qui facilite le transfert thermique : au centre, remontée de l'eau chaude et moins dense vers la surface, refroidissement au contact de l'air ambiant, descente de l'eau refroidie et plus dense à la périphérie, réchauffement au fond, et ainsi de suite. On retrouve l'analogie de ce phénomène à l'échelle des océans de notre planète (la circulation thermohaline), mais en beaucoup plus complexe, car la salinité modifie aussi la masse volumique de l'eau de mer.

Comment mettre la convection à profit pour faire circuler sans pompe de l'eau dans un chauffe-eau solaire ? En reproduisant le même phénomène au sein des canalisations du chauffe-eau (voir la figure 2).

Une partie de ce circuit est composée des capteurs solaires et contient de l'eau chaude. C'est un ensemble de tuyaux peints en noir, placés dans une boîte plate au fond noir et au couvercle de verre, afin d'absorber toute la lumière du soleil et d'optimiser le rendement thermique.

Dans une seconde partie se trouve l'eau non encore chauffée, destinée à aller vers les capteurs. Étant donné l'écart de température entre les deux parties, une circulation naturelle peut s'établir. Il existe cependant une différence notable par rapport à la casserole. Dans cet ustensile de



1. DANS UNE CASSEROLE placée sur le feu, l'eau au centre s'échauffe plus vite que celle située en périphérie. Moins dense, elle finit par s'élever, se refroidit au contact de l'air et, devenue plus dense, replonge un peu plus loin. Des rouleaux de convection naissent ainsi.

cuisine, l'écoulement est libre et se déroule à petite échelle (quelques centimètres). Dans un chauffe-eau, en revanche, la différence de pression due aux différences de densité entre l'eau chaude et l'eau froide doit compenser la perte de charge (diminution de la pression le long de l'écoulement) qui résulte de la résistance d'un fluide visqueux à l'écoulement dans de longs tuyaux.

Compenser la perte de charge

Lorsque l'écoulement n'est pas turbulent, cette perte de charge obéit à la loi dite de Poiseuille : elle varie comme le produit du débit par la longueur du tuyau et la puissance quatrième de son diamètre.

Pour s'assurer de la faisabilité du dispositif, comparons la différence de pression entre le bas d'une colonne d'eau à 20 °C et le bas d'une colonne identique d'eau à 50 °C (température aisément atteinte dans un chauffe-eau solaire à usage domestique). La différence de masse volumique entre ces deux températures étant d'une dizaine de grammes par litre, la différence de pression hydrostatique vaut environ 100 pascals (un millième d'atmosphère) pour une colonne haute de un mètre.

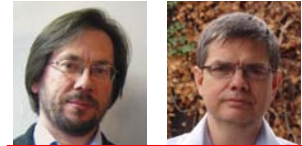
Pour calculer la perte de charge, il faut estimer le débit de l'installation. Atteindre 50 °C dans le ballon d'eau chaude nécessite une hausse de 30 °C par rapport à la température ambiante. Comme il faut 4 kilojoules pour élever de un degré la température d'un litre d'eau, il faudra, avec un capteur solaire de deux mètres carrés, environ une minute pour chauffer convenablement un litre d'eau si l'on suppose que toute la puissance lumineuse (de l'ordre de un kilowatt par mètre carré) est convertie en chaleur. Avec un débit de un litre par minute dans des tuyaux de diamètre intérieur de l'ordre du centimètre, on trouve une perte de charge d'environ 70 pascals par mètre de tuyau.

Or, comme on l'a vu, la différence de pression hydrostatique entre eau chaude et eau froide est d'environ 100 pascals par mètre vertical. Cela signifie que, en ordre de grandeur et à condition d'utiliser des tuyaux pas trop étroits, la convection

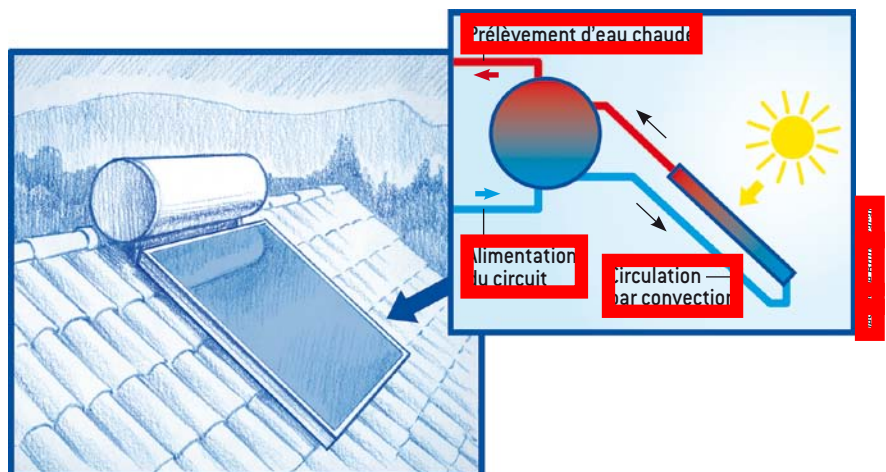
thermique peut faire circuler l'eau dans un tel système. Cela montre aussi que la mise au point et le dimensionnement d'un dispositif efficace exigent un réel savoir-faire, car la marge de manœuvre est faible.

Il y a tout de même un prix à payer. Comme l'eau chaude s'élève, il faut placer le réservoir au-dessus des capteurs solaires, et non au-dessous comme on aurait envie de le faire lorsque les capteurs sont sur le toit d'une maison. Les chauffe-eaux solaires à thermosiphon se reconnaissent ainsi à leur réservoir installé

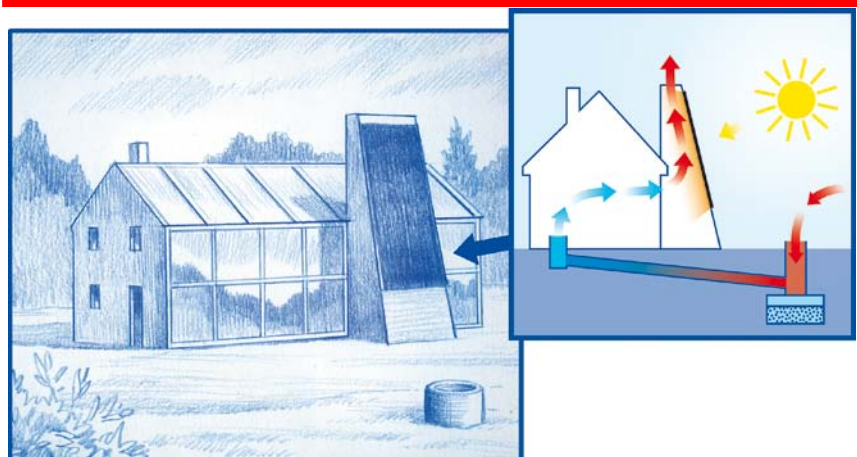
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idophus.fr>



2. DANS UN CHAUFFE-EAU SOLAIRE, l'eau froide (*en bleu*) est chauffée à l'intérieur d'un panneau qui absorbe le rayonnement du Soleil. Devenue plus chaude donc moins dense (*en rouge*), elle tend à s'élever et crée une circulation qui l'amène au réservoir, surélevé par rapport au panneau.



3. L'EFFET DE THERMOSIPHON peut être utilisé pour rafraîchir une maison. L'air contenu dans la cheminée est chauffé par la façade absorbante, et la différence de température entre cet air et celui qui a été refroidi sous terre crée une circulation. De l'air frais pénètre ainsi dans les pièces à vivre de la maison, tandis que l'air chaud est évacué.

BIBLIOGRAPHIE

S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30(3), pp. 231-295, 2004.

près du faite de la toiture. Ce n'est pas toujours esthétique, mais ces dispositifs ont l'avantage de fonctionner sans coupure de courant et leur entretien est minime : il n'y a pas de pompes, ni d'appareils pour les contrôler !

Une cheminée... rafraîchissante !

Le principe du thermosiphon permet aussi de se passer d'une climatisation électrique et de rafraîchir l'intérieur d'une maison (voir la figure 3). Dans ce cas, ce sont les différences de masse volumique entre air chaud et air froid que l'on met à profit. Si la masse volumique de l'air est un millier de fois inférieure à celle de l'eau, l'effet de réchauffement est bien plus important : une hausse de 30 °C diminue de dix pour cent

la masse volumique de l'air, et non pas de un pour cent comme dans le cas de l'eau.

Pour bénéficier de cette différence de masse volumique, on peut construire une cheminée dont la façade exposée au soleil est peinte en noir, de façon à chauffer l'air qu'elle contient sur une hauteur de plusieurs mètres. Si l'air s'échauffe de 60 °C sur une hauteur de cinq mètres, la différence de pression hydrostatique est de l'ordre de dix pascals. C'est peu : environ un dixième de la dépression caractéristique associée à une ventilation mécanique qui crée une circulation rapide de l'air dans les conduits d'aération. Mais, en faisant circuler l'air en sous-sol pour refroidir préalablement l'air ambiant, en utilisant des conduits de gros diamètre ou les grands volumes d'une maison, cela peut suffire, à condition d'éviter toute perte ou tout effet parasite.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

LUMIÈRE SUR LES SCIENCES

32^E CONGRÈS NATIONAL DES PROFESSEURS DE PHYSIQUE & CHIMIE

26 ~ 29 OCT. 2014 / LYON

Informations & renseignements : www.udppc.asso.fr/lyon2014

udppc



SciLogs

La nouvelle communauté de
bloqueurs scientifiques francophones

De blogs en blogs,
explorez la science en direct
avec ceux qui la font,
commentez les articles
et participez au débat !

Complexités

Vos raisonnements et conceptions seront remis en question par Jean-Paul Delahaye, auteur de la rubrique Logique et Calcul dans *Pour la Science*. Dans son blog, il présente des jeux et énigmes mathématiques, des paradoxes logiques et numériques et des nouveautés en informatique.

Signal sur bruit

Découvrez les réflexions de l'astrophysicien Richard Taillet. Matière noire, énergie sombre et autres découvertes en physique et astrophysique... votre soif de connaissance sera assouvie.

Best of Bestioles

Explorez chaque semaine les merveilles du monde animal dans le blog de Loïc Mangin, rédacteur en chef adjoint de la revue *Pour la Science*. Insectes, mammifères, crustacés, amphibiens et bien d'autres n'auront bientôt plus de secrets pour vous.

Retrouvez aussi les autres communautés « SciLogs » :

déjà plus de 140 bloqueurs scientifiques à l'international !



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.SciLogs.fr



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par

POUR LA
SCIENCE

QUESTION AUX EXPERTS

Combien y a-t-il de planètes dans la Voie lactée ?

Notre galaxie compterait au moins 100 milliards d'exoplanètes, selon les estimations statistiques !

Arnaud CASSAN



Notre galaxie regroupe quelque 150 à 200 milliards d'étoiles, qui dessinent dans le ciel une bande diffuse laiteuse – d'où son nom de Voie lactée. Combien d'entre elles abritent des planètes ? Au cours des deux dernières décennies, les astronomes ont détecté assez de ces dernières pour réaliser de premières estimations.

Fin mai 2014, on avait confirmé la détection d'environ 1 800 exoplanètes (planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil). Elles sont réparties dans près de 1 100 systèmes planétaires, qui sont loin de ressembler au nôtre. Nombre d'entre eux comprennent par exemple des « jupiters chauds », planètes géantes si proches de leur étoile que l'année (la période de révolution autour de l'étoile) n'y dure que quelques heures ou quelques jours. Dès lors, le Système solaire ne peut servir de référence pour l'estimation de l'abondance des planètes.

L'une des difficultés d'une telle estimation est que chaque technique d'observation a un domaine de sensibilité limité. Ainsi, une planète n'est repérable par la méthode des transits (où l'on détecte son passage devant l'étoile) que si elle est assez proche de son étoile. Les diverses techniques disponibles ont des domaines de sensibilité complémentaires, mais des zones d'ombre demeurent. En outre, en dehors des cas où deux méthodes sont requises pour confirmer une détection, une même étoile n'est souvent scrutée qu'avec l'une d'elles. On ne détecte donc jamais toutes les planètes d'un système donné.

Seules des méthodes statistiques permettent alors d'estimer l'abondance des exoplanètes. La première étape consiste à choisir un échantillon représentatif d'étoiles et à extrapoler les détections réalisées, un peu comme on estime le résultat d'une élection à partir d'un sondage. Chaque analyse est effectuée pour une méthode de détection donnée et ne concerne donc que les gammes de distances orbitales et de masses stellaires et planétaires auxquelles cette méthode est sensible. On déduit ensuite le nombre de planètes par un traitement statistique du nombre global de détections et d'absences de détection, en prenant en compte la sensibilité de la méthode. Ces études nécessitent d'importantes bases de données, dont la construction prend souvent plusieurs années.

Premières statistiques

On commence à obtenir des résultats. Une étude publiée en 2011 par l'équipe de l'astronome suisse Michel Mayor indique qu'au moins une étoile de type solaire sur deux abrite une planète – la Galaxie comptant plusieurs dizaines de milliards de ces étoiles. En 2012, j'ai trouvé avec mes collègues une valeur moyenne d'environ une planète par étoile dans la Voie lactée : notre étude couvrirait un plus grand intervalle de masses et de distances orbitales que celle de M. Mayor. Au total, en tenant compte des marges d'erreur, l'ordre de grandeur serait donc d'au moins 100 milliards d'exoplanètes.

De quel type sont ces planètes ? Selon nos travaux, deux tiers des étoiles ont une

super-Terre (planète rocheuse de masse comprise entre deux et dix fois celle de la Terre), la moitié ont une planète de la masse de Neptune et un sixième une planète du type de Jupiter. De façon générale, toutes les études indiquent que les planètes sont d'autant plus abondantes que leur masse est faible. En 2012, Xavier Bonfils, de l'Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble, et ses collègues ont estimé qu'au moins 54 milliards de super-Terres sont en orbite dans la zone habitable (la région où de l'eau peut exister à l'état liquide) d'étoiles de type naine rouge. Trop peu de planètes de la taille de la Terre ont été détectées pour qu'on estime leur nombre, mais elles pourraient aussi être très abondantes.

Tous ces chiffres sont des minimums, puisque chaque estimation ne concerne qu'un intervalle de masses et de distances orbitales donné. Qu'en est-il du maximum ? Les théories de formation planétaire indiquent qu'un système ne peut comprendre plus d'une dizaine de planètes. La Galaxie abriterait donc moins de 2 000 milliards d'exoplanètes !

La vie s'est-elle alors développée ailleurs que sur Terre ? La réponse est encore hors de portée. Mais avec la découverte récente que la présence de planètes autour d'une étoile est la règle plutôt que l'exception, les chances que certains de ces mondes lointains soient habitables, voire habités, ne semblent pas nulles...

Arnaud CASSAN est chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris

SCIENCE & GASTRONOMIE

La cuisson des pâtés lorrains

Cette cuisson doit être assez longue pour que la viande se contracte et libère des composés dont s'enrichira le goût de la pâte.

Hervé THIS



Les pâtés lorrains sont des préparations faites de viande de veau et de porc marinées au vin blanc, puis cuites dans une pâte (sans oublier persil, échalote, sel, poivre, noix muscade et œuf battu pour dorer la pâte...). Tous les ans, se tient un concours mondial du pâté lorrain, et les meilleurs produits ont un goût très particulier. Comment l'obtient-on ? Il y a dix ans, pour explorer cette question, nous avons produit une série de pâtés lorrains tous identiques qui ont été cuits ensemble, dans le même four, pendant des temps différents. Le goût délicieux survenait après environ une heure de cuisson.

Pourquoi ? La question est restée lancinante, jusqu'au dernier Concours général agricole, où les terrines (un système analogue, mais sans pâte) ne méritaient pas de médaille. Pourquoi ? Parce que cette mélé de viande et d'épices exige une cuisson attentive. Selon une « précision culinaire » des milieux professionnels, les terrines perdent leur goût après une heure et quart de cuisson. Vrai ? Faux ?

Lors d'un récent séminaire, nous avons testé cette idée en cuisant des terrines identiques dans un même four, à la température bien réglée. Pour nous assurer de la constance des températures dans un four où, malgré la ventilation, des zones de différentes températures sont produites, nous avons repris la pratique professionnelle, qui consiste à appliquer une température de consigne de 180 °C, mais en plaçant les terrines dans un bain-marie.

Première observation : les recettes, qui indiquent une durée de cuisson et une température à cœur du produit, ne donnent pas des indications fiables, car la taille des terrines n'est pas toujours prise en compte. Ainsi, dans nos terrines cuites le moins de temps, la température à cœur est restée inférieure à la température de cuisson des protéines de la viande les plus facilement coagulables ; autrement dit, les terrines n'étaient pas cuites.

Nous avons enregistré les températures à cœur de toutes les terrines : dans la croûte, au centre, au fond. Évidemment, la partie supérieure de la croûte est à 180 °C, l'eau de la viande hachée étant évaporée. Cette température diminue progressivement à mesure que l'on s'approche de la partie inférieure de la croûte, où la température ne dépasse pas 100 °C. C'est au cœur des terrines que la température est la plus basse.

Finalement, les terrines cuites plus d'une heure et quart étaient de faible goût. Cependant, la matière grasse qui avait suinté de la préparation était... salée ! Salée alors que le sel ne se dissout pas dans l'huile ? Il fallait que le sel soit présent sous la forme de cristaux, ou bien dissous dans de petites gouttes de solution aqueuse dispersées dans l'huile.

À la réflexion, cette observation est probablement la clef du mystère du pâté lorrain. Dans les deux cas, il y a de la viande que l'on cuit. Or on sait que le tissu animal chauffé se contracte, en raison notamment de la dénaturation du collagène. La protéine

formant le tissu qui limite les fibres musculaires et les réunit en faisceaux. C'est pour éviter cette contraction que l'on entaille les poissons avant de les griller, et que les cuisiniers préfèrent cuire les viandes sur leurs os : l'adhérence du tissu musculaire à l'os évite la rétraction des chairs.

Pourquoi cette rétraction est-elle nuisible ? Pas seulement pour des raisons esthétiques, mais aussi parce que la viande qui se contracte expulse son jus. D'où le résidu brun, dans la cocotte, quand on cuit un rôti de bœuf, par exemple. Plus la température est augmentée, même avant la température d'ébullition de l'eau, même dans l'eau d'un bouillon, plus la viande perd de sa masse.

D'où, dans les terrines, la matière grasse qui entourait la chair coagulée ; d'où la perte de goût et du sel. Ce qui est nuisible dans une terrine, en raison des pertes, est bénéfique pour les pâtés lorrains, dont la pâte boit les produits expulsés par la coagulation. Et c'est pourquoi il faut un long temps de cuisson pour faire de bons pâtés lorrains.



Hervé THIS est physico-chimiste dans le Groupe INRA-AgroParisTech de la gastronomie moléculaire et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

SCIENCE ET HUMOUR

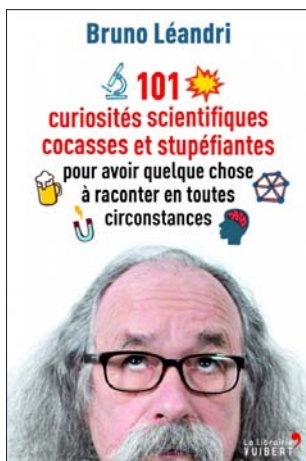
101 curiosités scientifiques cocasses et stupéfiantes

Bruno Léandri

Vuibert, 2014
(176 pages, 13,90 euros)

Léandri est l'Alphonse Allais de la bouffonnerie scientifique moderne. Comme son illustre prédécesseur bon florentin (merci Google), B. Léandri nous raconte les aventures croustillantes et cocasses des découvertes et des habitudes de nos illustres savants, travers bénins qui contrastent avec un sérieux attendu. Les défauts enfantins humanisent les scientifiques dont l'humour et l'espièglerie ne sont guère les caractéristiques principales.

Vous l'avez deviné, B. Léandri prend du recul et s'interroge sur les incertitudes que nous aurions



il faut relever. De combien de chats morts virtuels l'expérience conçue par Schrödinger est-elle responsable ? Où se trouve le point zéro de la latitude et de longitude ? Le nombre 39 est-il remarquable oui ou non... etc ?

Nombre d'historiettes sont des éloges de la sérendipité, l'art de gagner un concours de circonstances. Ainsi, Oersted a découvert l'effet du champ magnétique grâce

à une boussole qui se trouvait là par hasard, Percy Spencer a découvert le chauffage par micro-ondes grâce à sa prévoyance gourmande qui l'avait conduit à placer une barre de chocolat dans sa poche, Fleming a eu la chance que des moisissures inopinées détruisent les bactéries de ses boîtes de Pétri, et ainsi de suite. On se souvient que l'astronome P. Fleming a observé que l'émission des étoiles brouillait l'écoute (sic) de son poste radio resté ouvert. Nous avons là une petite leçon de morale : n'avons-nous jamais balayé sous le tapis des effets perturbateurs qui nous empêchaient d'avancer dans nos expériences ? Ce faisant, nous avons peut-être, dans un souci d'efficacité malencontreux (merci les planificateurs et les gestionnaires de la recherche), laissé passer une découverte plus importante que le travail qui nous occupait !

Quand vous lirez ce livre, vous éprouverez presque autant de plaisir que B. Léandri a eu à l'écrire. Pour ma part, je vais l'offrir à mon petit-fils Bastien afin de l'intéresser à la chose scientifique, car il n'a malheureusement que peu accroché à la *Critique de la raison pure*, beau livre familial relié pleine peau.

P.S. Remarquez que, grâce à des contorsions, j'ai pu éviter le mot « pas » dans le texte. Si vous voulez savoir pourquoi le mot n'en est pas moins intéressant, lisez la page 139 du livre de Léandri.

Michelle Boulange

ZOOLOGIE

Histoires remarquables Les animaux

F. Moutou et F. Desbordes (illus.)

Delachaux & Niestlé, 2014
(254 pages, 17,50 euros)

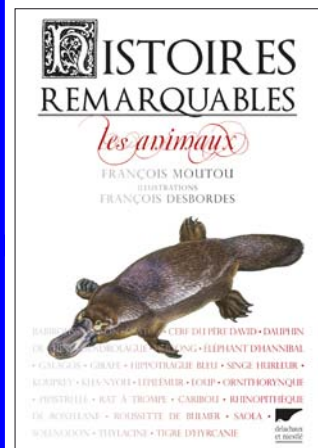
Parmi les mammifères abordés dans les 26 courts chapitres qui composent ce livre, certains, tels le loup, le

castor, l'éléphant ou la girafe, nous sont familiers. D'autres le sont beaucoup moins, tels le dendro-ague (un kangourou arboricole), l'hippotrague (une antilope) ou le kha-nyou (un rongeur laotien récemment découvert et qui est aussi un « fossile vivant »).

Mais que l'animal soit connu de tous ou seulement des spécialistes, l'auteur a su avec beaucoup de talent raconter à son sujet une « histoire remarquable » qui nous fait découvrir une facette inconnue de sa biologie, de son histoire évolutive, des circonstances de sa découverte, ou encore de ses rapports avec l'homme.

Pele-mele, le lecteur s'interroge sur la provenance des éléphants d'Hannibal (Afrique ou Asie ?), découvre que certains mammifères (comme l'ornithomyne ou le solénodon) sont vivants, constate que garder les animaux en captivité peut permettre de sauver des espèces (le cerf du Père David en est un exemple éloquent), et réalise que l'on découvre encore de nos jours de grands mammifères jusque-là ignorés de la science (tel le saola du Vietnam, un bovidé qui peut peser 100 kilogrammes, décrit en 1992). Et si les animaux éteints ne lui sont pas familiers, les dessins aussi jolis que précis qui illustrent chaque chapitre lui montrent clairement à quoi ils ressemblent.

A travers les anecdotes et les descriptions bien choisies, l'extraordinaire diversité des adaptations des mammifères devient évidente : l'évolution des espèces nous révèle toujours des surprises. L'aspect plus sombre de la question, c'est que cette diversité est menacée : plusieurs des espèces décrites ici ont disparu, parfois récemment (comme le baiji, le dauphin d'eau douce du Yangtsé, déclaré éteint en 2006, ou sont extrêmement



menacées, comme la roussette de Bulmer, une chauve-souris de Nouvelle-Guinée dont il ne reste au mieux que quelques centaines d'individus. Mais d'autres exemples donnent de l'espoir : le castor, qui revient de loin, n'est pas en train de réoccuper les rivières françaises ? Ce livre très accessible, au style fort agréable et non dénué d'humour, est une magistrale illustration des beautés de la zoologie.

Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure

ASSYRIOLOGIE

Les débuts de l'histoire

P. Bordreuil, F. Briquel-Chatonnet et C. Michel (dir.)

Khéops, 2014
(518 pages, 25,50 euros)

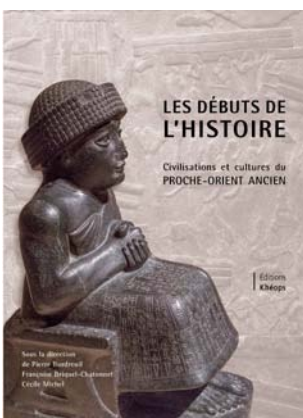
Il est impossible de rendre compte de la richesse de cet ouvrage consacré au Proche-Orient ancien. C'est une véritable gageure que de présenter un tableau de la civilisation de cette partie du monde durant une période qui va de la fin du Néolithique à la conquête d'Alexandre. À cet effet, près de 40 spécialistes

ont été réunis: archéologues, épigraphistes, historiens, historiens de l'art, des techniques, spécialistes des sociétés ou des religions...

L'ouvrage est divisé en quatre parties. La première est intitulée «Du village à la ville»: on connaît le rôle essentiel de l'urbanisation dans la structuration des cultures du Proche-Orient, en liaison étroite avec la gestion des matières premières, les innovations techniques, les échanges.

L'étude des cites-Etats, objet de la deuxième partie, aborde les institutions, avec la fonction royale et l'importance du palais, noyau à partir duquel se sont constitués les empires, tels ceux de Sargon et de Darius.

Mais ces institutions constituent d'abord le cadre de la société, abordé dans la troisième partie. La base en est la structure familiale «au cœur de la société», pour



prendre le titre du premier chapitre. Une place de choix est faite au droit et à la législation, qui ne se limitent pas aux seuls codes, fussent-ils aussi célèbres que celui de Hammurabi, ni à la justice rendue par Salomon.

Le génie de la société, qui se traduit à travers les différentes expressions de son rapport au monde – science, création littéraire et artistique, pensée religieuse – vient parachever l'exposé. Cela

conduit, bien sûr, à des choix drastiques. On n'en saura que plus gré aux auteurs d'avoir pu exposer un tel panorama de la connaissance et des réalisations de tant de peuples différents, dans un espace aussi vaste et sur une aussi longue durée. À côté des illustrations, au nombre forcément limité dans ce type d'ouvrage, de nombreuses citations de textes religieux, textes moraux, prescriptions, documents empruntés à la vie quotidienne, rendent l'exposé vivant, en permettant au profane d'entrer dans une documentation soignée et d'en percevoir la richesse et la saveur.

On retiendra le chapitre consacré à l'écrit, envisagé du point de vue du support, des institutions et de l'archivage. Mais l'écriture est aussi le témoin de langues, attestant de rapports multiples à l'intérieur d'un groupe social homogène et entre des groupes hétérogènes, voire étrangers. L'exemple particulier de stèles bilingues, s'adressant simultanément et différemment à deux publics, est très intéressant.

L'une des originalités est de montrer comment les textes bibliques s'élaborent et s'insèrent dans une tradition culturelle millénaire et comment une religion monothéiste prend ses racines dans une conception royale et nationale du divin.

L'ensemble a été enrichi depuis la précédente édition, avec le développement de nouvelles rubriques: par exemple, la peinture murale, dans le chapitre consacré aux œuvres d'art, la prêtrise, dans celui consacré à la religion.

L'ouvrage est illustré par de nombreuses figures dans le texte, complétées par un cahier en couleurs à la fin. Des cartes permettent de visualiser les principaux royaumes qui se sont constitués à différentes époques. Une

chronologie, des index et une riche bibliographie complètent l'ensemble, que l'on recommande chaudement.

Nadine Guilhou
Université de Montpellier II

PHILOSOPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

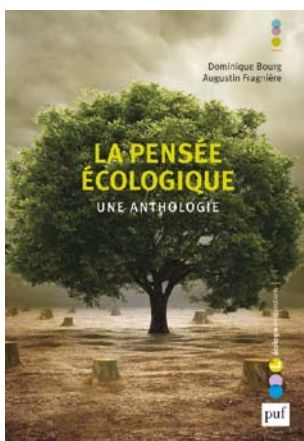
La pensée écologique Une anthologie

D. Bourg et A. Fragnière

PUF, 2014
(896 pages, 30 euros).

Cette judicieuse sélection de textes relatifs à l'écologie et à l'environnement fait découvrir nombre de notions des relations de l'humanité avec son environnement.

Les auteurs, l'un professeur de philosophie, l'autre docteur à l'Université de Lausanne, mettent par exemple en valeur Élisée Reclus, à l'origine d'une immense œuvre de géographie humaine et politique, le géographe et climatologue Alexandre Woeikoff, qui s'interroge sur les impacts néfastes de l'homme sur l'environnement, ou encore le naturaliste William Vogt, auteur d'un best-seller en 1948 (*La Faim du monde*) qui met en lumière le caractère limité des ressources naturelles avec l'explosion démographique.



Végétariens, le vrai du faux

Anne Jankéliowitch

Delachaux & Niestlé, 2014
(168 pages, 12,90 euros).

Le plaidoyer en faveur du végétarisme n'a rien de dogmatique. L'auteur fait le tour de ce mode alimentaire, en décrit la progression et explique ses atouts pour la santé sans nier ceux de la viande. Il souligne aussi ses avantages éthiques sachant qu'en France seulement, plus d'un milliard d'animaux ont mis à mort chaque année, souvent après une vie misérable. Sa conclusion est que rien ne permet de dénigrer tant une alimentation carnée qu'une alimentation végétarienne, mais qu'une réduction de la part de viande sera de toute façon nécessaire pour protéger la planète.



Naissance et diffusion de la physique

Michel Soutif

DP Sciences, 2014
(265 pages, 49 euros).

La physique moderne s'est développée en Eurasie, remarque l'auteur. Puis il nous étonne en montrant comment l'esprit empirique chinois et l'esprit théorique grec ont, chacun de son côté, préparé les inventions techniques et les fondements théoriques nécessaires à sa naissance. Une naissance qui se produira une fois que les inventions chinoises, mais aussi l'esprit empirique, auront diffusé en Europe. La physique moderne associe mathématiques et expérience, et il est clair que nous la devons à une énorme somme d'observations et d'expériences accumulées par les Eurasiens depuis le Paléolithique.



Le loup

A. de Malleray (dir.)

Glénat, 2014
(96 pages, 19,90 euros).

Le loup revient et il faut lui faire une place convenable. La revue transdisciplinaire *Villebaude* qui, chaque mois, interroge une facette du rapport entre l'homme et la nature, lui consacre son quatrième numéro. Conçu pour prolonger le traitement du même sujet par le Musée de la chasse et de la nature, à Paris, ce très beau cahier assemble des contributions de spécialistes du loup, d'historiens et d'écrivains, et aidera notre culture à se réapproprier le loup.



Histoire des cristaux

Bernard Maitte
Hermann, 2014
334 pages, 26 euros

Les cristaux fascinent par leurs couleurs variées, leurs formes géométriques et régulières. Tout cela vient de symétries. C'est ce fil conducteur que suit l'auteur. Il commence avec les philosophes grecs, et en particulier les atomistes. On retrouve ensuite les cristaux dans de nombreux domaines scientifiques, allant de la chimie à la physique, en passant par la biologie. Depuis le XX^e siècle, les rayons X ont permis d'y sonder la distribution des atomes, et de se persuader du rôle crucial qu'y jouent les symétries.

Le comportement pour comprendre mieux et davantage



Claude Baudouin
Le Square, 2014
160 pages, 15 euros

L'auteur nous plonge dans l'étude du comportement animal : l'éthologie. Au cours du XX^e siècle, les chercheurs se sont intéressés aux capacités d'apprentissage, à la conscience de soi, aux échanges sociaux chez les animaux, etc. Ce livre à l'intérêt de nous faire appréhender la sensibilité des animaux en tant qu'objet d'étude. Il fournit de nombreux aperçus sur la façon dont nous devrions prendre en compte ce savoir pour améliorer notre façon de vivre avec les animaux, et en apprendre plus sur nous-mêmes.



La fabrique des sciences modernes

Simon Schaffer
Beyl, 2014
446 pages, 24 euros

Les profondes mutations de la pratique scientifique du XVII^e au XIX^e siècle sont le sujet de ce livre. L'auteur montre sous divers éclairages comment les sciences sont venues l'affaire de la société. Le savant doit interagir, échanger, confronter ses idées et les artisans sont sollicités pour fabriquer les instruments de mesure. Et naissent les nouvelles structures – laboratoires, académies et observatoires – et un public enthousiaste. Ce foisonnement, sur fond de l'avènement du capitalisme industriel, a donné naissance aux sciences modernes.

L'anarchiste Murray Bookchin, théoricien de l'écologie sociale, nous invite à nous reconnecter avec le mouvement cherchant à établir une société municipaliste, non autoritaire, décentralisée et respectueuse des hommes et de la nature, ainsi que le philosophe Peter Singer, célèbre pour son livre *La Libération animale* et qui s'est exprimé aussi sur les aspects éthiques de notre relation à l'environnement, illustrent la diversité des auteurs sélectionnés.

On peut certes discuter certains choix. Par exemple, l'extrait de Reclus est tiré de sa première grande œuvre de géographie, *La Terre* (1868), alors qu'il aurait été plus significatif de puiser dans *L'Homme et la Terre* (1905) où il développe pleinement sa conception originale de la place de l'homme dans la nature, ainsi que sa vision du progrès et de l'évolution. On peut aussi regretter que seulement deux pages soient consacrées à Patrick Geddes, un penseur peu connu en dehors des spécialistes, qui a développé une conception passionnante d'un urbanisme centré sur le respect de l'individu.

Ces détails ne doivent cependant rien occulter de l'intérêt et de l'utilité de l'ensemble du volume. Il faut souligner la qualité didactique de cet ouvrage, qui permet de disposer de façon synthétique des repères les plus pertinents relevant de l'histoire et de la philosophie de l'environnement : ce livre permet vraiment de saisir l'ancienneté, la diversité et la complexité de la pensée écologique. Le dispositif éditorial est bien pensé : courtes notices biographiques, introduction pour chacun des différents thèmes (« La croissance en question », « Droits de la nature ou devoirs de l'homme ? », « Climat et justice internationale »), bibliographies complémentaires, même si l'on regrette l'absence d'un index. Un

ouvrage « pavé » essentiel à tous ceux qui cherchent à mieux comprendre la complexe pensée écologique.

Valérie Chansigaud

Laboratoire SPHERE
CNRS-Université Paris-Diderot

ÉCOLOGIE

Si le chant des baleines s'éteignait

Jean-Pierre Sylvestre
Albin Michel, 2014
332 pages, 22 euros

Le titre est parfaitement choisi et résume bien les enjeux des menaces qui pèsent sur les mammifères marins. Comme celui, qui, un jour, s'est senti pleinement heureux d'entendre le chant des baleines ou de regarder les dauphins jouer avec l'étrave du bateau, doit lire ce livre ! Après de nombreuses missions d'étude et d'observation, qui l'ont conduit à fréquenter les milieux aquatiques de nombreuses régions de la planète, l'auteur présente une étude appuyée sur l'état des populations de ces animaux.

Il est qualifié pour la mener, puisqu'après avoir étudié les cétacés et les requins au Muséum national d'histoire naturelle, il a voyagé dans le monde entier afin d'observer le comportement des baleines, orques et autres dauphins, s'attachant ensuite à en faire connaître la biologie et les modes de vie par de magnifiques images et des livres.

Il vient ici faire savoir la réalité des menaces qui les font disparaître des fleuves et des mers. La dernière victime en date est le dauphin du Yang-Tsé-Kiang, ou dauphin de Chine, qui vécut



Jusqu'à 2006 dans le grand fleuve chinois, jusqu'à ce que les cargos et la pollution en aient raison.

Après un chapitre traitant de la diversité des mammifères marins, un bilan des extinctions anciennes et récentes est présenté. L'auteur explique la situation des espèces au bord de l'extinction ou en danger, évoque celles qui restent méconnues, puis évalue les populations de nombre d'espèces, qu'il s'agisse de cétacés, de l'ours blanc, de phoques ou encore de loutres de mer et autres mammifères. Il expose clairement, appuyé à l'appui, les menaces qui pèsent sur chacune d'elles : chasse excessive injustifiée de nos jours, conséquences des pollutions dues à l'homme, etc.

Un ouvrage passionnant, fascinant – et inquiétant – pour tous les défenseurs de la nature et du maintien de la biodiversité à la surface de notre planète, en particulier des mammifères marins.

Patrick Rachebœuf

Directeur de recherche
émérite au CNRS

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



Cet été, lisez léger avec



Toute l'information scientifique
100% numérique

6,50 € par mois
seulement !

Accès numérique illimité* au magazine *Pour la Science*, au thématique *Dossier Pour la Science*
ainsi qu'à près de 300 numéros archives sur **www.pourlascience.fr**

Pendant toute la durée de votre abonnement

Bulletin d'abonnement

découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à
groupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 362 - 75 261 Paris cedex 06

MA FORMULE

☒ **OUI**, je m'abonne à l'offre **Web illimité à 6,50 € par mois** ou 78 € pour 1 an. Pendant toute la durée
de mon abonnement, je bénéficie d'un accès numérique illimité au mensuel *Pour la Science*
et son trimestriel *Dossier Pour la Science* + 18 ans d'archives sur **www.pourlascience.fr** !

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules) _____

À la réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE



1. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

2. MON MODE DE RÈGLEMENT

☒ Je règle par prélèvement **6,50 € par mois**. Je remplit l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT

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.

PAR MANDAT SEPA

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPT

Nom, prénom _____

Adresse _____

Code postal _____

2 - COORDONNÉES BANCAIRE

BAN _____

BIC _____

Code international d'identification des établissements bancaires (BIC) (Bank Identifier Code)

Type de paiement _____

☒ Paiement récurrent/répétitif

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRE

À _____

Date _____

Signature : _____

NOM DU CRÉANCIER *Pour la Science* _____

N° de référence unique de mandat (RUM) _____

☒ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 78 €**

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

☐ Par carte bancaire _____

Date d'expiration _____

Clé _____

Signature obligatoire _____

Offre numérique, valable sans limitation de zone géographique. L'abonnement en prélèvement est renouvelé facilement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 1 mois. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement
de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case.

jusqu'au 31.08.17
réserve aux nouveaux abonnés v
PLS442

A BAS LE GENERAL

Longtemps, l'éthologie a discrédité les anecdotes. Elle se voulait fondée sur les seules observations reproductibles. Quand un témoin décrivait le com-

portement inouï d'un animal manifestant une capacité inattendue, elle le soupçonnait d'avoir trop d'imagination. Aujourd'hui, elle ne se permet plus de jeter *a priori* la suspicion sur une anecdote étonnante.

Les mathématiques ont suivi un mouvement analogue. Au XX^e siècle, une tendance dominante fut la recherche des généralisations. Aujourd'hui, les cas particuliers, les curiosités – bref, les anecdotes – sont moins méprisés.

De même, en littérature. A l'époque du Nouveau Roman, raconter une histoire semblait niais. Aujourd'hui, ce dédain pour la narration d'anecdotes n'est plus de mise.

Si j'étais dans l'état d'esprit du XX^e siècle, je devrais, avant de généraliser, concocter quelque théorie (le progrès des technologies fait que chacun de nous possède des objets personnalisés, d'où un individualisme propice au retour en faveur de l'anecdote), et à désigner par un terme censé caractériser notre époque (disons, le singularisme). Le

parallélisme de l'éthologie, des mathématiques, de la littérature, cesserait alors d'être anecdotique : ma théorie du singularisme l'explique. Mais nous sommes au XXI^e siècle ! En tant qu'anecdotes, les exemples ci-dessus ont valeur en soi. Plus n'est besoin de lourde théorie pour s'autoriser une conclusion. Que voici. Notre époque, libérée du précepte « Il n'est de science que du général », est en train d'accomplir une tâche historique : élaborer la science du particulier.

Et maintenant, parlez-nous un peu de vous...

LE PIRE SERA-T-IL SUR ?

Je n'est pas certain que la science saura un jour déterminer quelles pensées sont en train de traverser l'esprit d'un individu. Mais, si elle y arrive, il est certain qu'une autre

viendra : celui où les pensées déviantes seront réprimées par les lois.

Les comités d'éthique mettront en garde, mais rien n'y fera. La presse révélera qu'on savait que, depuis son enfance, tel meurtrier nourrissait de secrètes pensées assassines, et les gouvernements, pour calmer l'opinion, édicteront des lois réprimant toutes les envies de meurtre, même refoulées. Petit à petit, on réprimera aussi les désirs de changement de l'ordre social, fussent-ils cantonnés dans le for intérieur du sujet.

Les recherches sur le cerveau sont aussi exaltantes que seront effrayantes certaines de leurs conséquences si elles réussissent.

LE MYSTÈRE DE CES INFINIS M'EFFRAIE..

Le sens commun ne conçoit l'infini que comme potentiel, inaccessible. Les mathématiciens et les physiciens, eux, recourent

à l'infini actuel, c'est-à-dire réalisé (ainsi, les nombres entiers forment un ensemble infini). L'infini actuel leur inspire d'autant moins de réticences que, depuis la fin du XIX^e siècle, il a montré une fécondité extraordinaire. Son efficacité est indiscutable.

Mais être efficace, est-ce être légitime ? Répondre oui revient à donner le primat à la technique, qui ne connaît guère d'autre valeur que l'efficacité : un projet qui réussit prouve par là qu'il était bien fondé. Seulement, les mathématiques et la physique, en tant que sciences, ont vocation à comprendre. Or cela ne va pas toujours de pair avec l'efficacité. On peut comprendre sans être efficace : proposer d'une théorie expliquant l'équilibre du vélo ne fait pas de vous un champion. On peut être efficace sans comprendre : certains remèdes agissent sans qu'on sache

pourquoi, les Chinois utilisaient la boussole sans connaître le magnétisme terrestre, etc.

C'est ne rien comprendre à l'infini que d'occulter qu'il a en lui quelque chose d'incompréhensible ! Considérer que, puisqu'on sait le manier avec efficacité, il est devenu un outil pas plus troublant qu'un autre, c'est donner une réponse purement technique à une question qui, touchant au vertige de l'homme devant ce qui le dépasse, a une portée métaphysique. Cela renforce la tendance de notre société à privilégier une approche technicienne de tous les problèmes. Des sciences plus émues par le mystère de ce qui échappe à l'homme, quitte à être moins efficaces, seraient, à mes yeux, plus riches. En tout cas, leur façon de manier l'infini n'est pas une affaire interne. Elle engage une conception générale sur la place que la technique doit occuper.



PARADOXE EPHEMERE

Le diction « Qui se ressemble s'assemble » est autoréférent, puisqu'il est obtenu en assemblant deux mots qui se ressemblent. Autoréférent ? Mais alors, doit-il avoir un paradoxe pas loin !

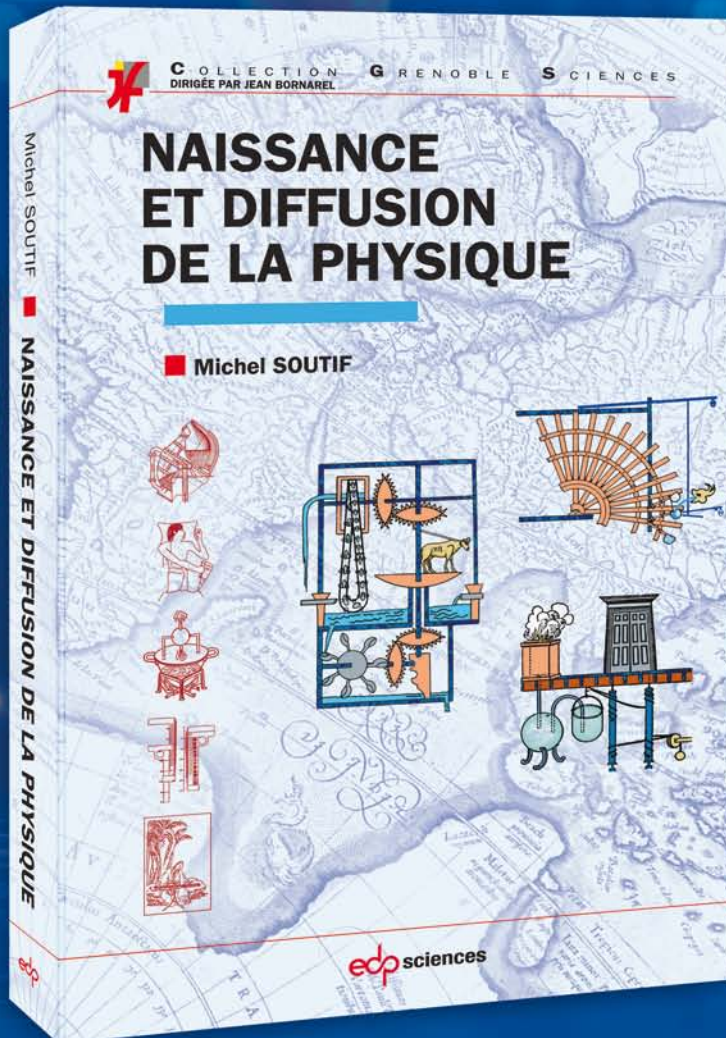
Tel est bien le cas. La valeur de vérité de ce diction est sans doute la même que celle des autres dictions, c'est-à-dire assez faible. Pourtant, il ne pourra jamais être mis en défaut. Supposons, en effet, que je connaisse Martin et Durand et que je sois amené à constater : « Ils se ressemblent, mais ne s'assemblent pas ». Et voilà Martin et Durand, parce qu'ils se ressemblent, assemblés dans une même phrase ! Sitôt énoncé, ce contre-exemple cesse d'en être un.

GRENOBLE SCIENCES

vous présente la réédition de

NAISSANCE ET DIFFUSION DE LA PHYSIQUE de Michel Soutif

Une découverte unique de la discipline à travers les siècles



■ L'OUVRAGE

Comprendre comment la physique, science de modélisation du réel, s'est construite au fil des siècles par la confrontation entre expériences et raisonnements.

■ L'AUTEUR

Michel Soutif est un grand physicien en même temps qu'un historien d'une extraordinaire érudition dont l'écriture limpide permet d'acquérir des savoirs avec facilité et humour.

■ PUBLIC

Pour tout public désirant se cultiver sur l'évolution des sciences, des civilisations et sur la diffusion des idées.

Collection Grenoble Sciences

Livre couleur avec de remarquables illustrations
288 pages, couverture reliée

POUR COMMANDER

Cet ouvrage est en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet : <http://www.edition-sciences.com>

■ GRENOBLE SCIENCES

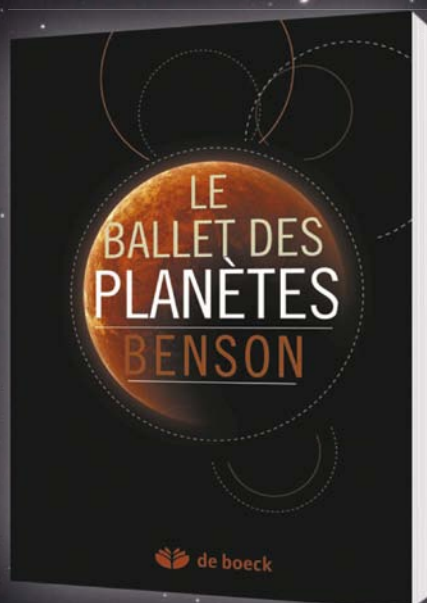
<http://www.grenoble-sciences.com>

Université
Joseph Fourier 
GRENOBLE

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95 – Fax. (33)4 76 51 45 79
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

RhôneAlpes ^{Région}

Plaisir des sciences



Le ballet des planètes

De l'élégance mathématique des orbites planétaires

Donald Benson

Traduction de Benoît Clenet

Cet ouvrage décrit la compréhension du mouvement des planètes sous son aspect historique, illustre pourquoi la méthode scientifique a porté ses fruits dans le passé et comment elle fonctionne dorénavant.

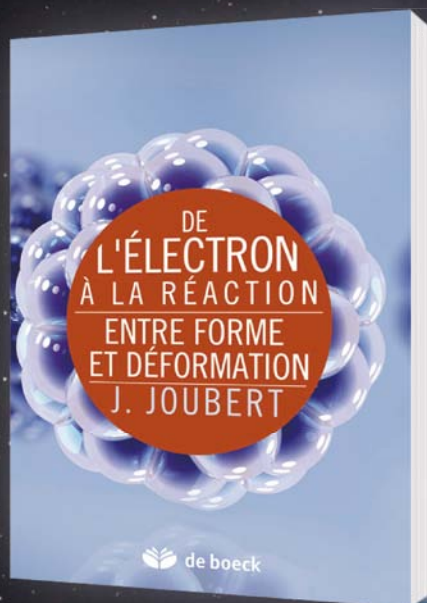
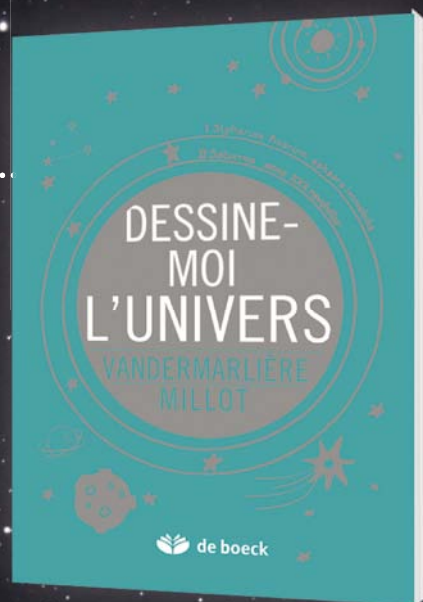
Edition 2014 | 17 € | 200 p.

Dessine-moi l'Univers

Cédric Millot, Julien Vandermarlière

Comment les hommes se sont-ils représenté l'Univers à travers les âges ? Ce livre expose de façon simple et claire les mécanismes qui ont permis à la pensée scientifique de naître et d'évoluer de l'Antiquité à nos jours.

Edition 2013 | 15 € | 104 p.



De l'électron à la réaction

Entre forme et déformation

Jérôme Joubert

L'esthétique de la chimie quantique est ici abordée dans une approche qualitative des structures et des phénomènes qui régissent tant notre environnement immédiat que l'autre bout de l'Univers.

Edition 2013 | 29 € | 150 p.

À la recherche de la matière noire

Histoire d'une découverte fondamentale

Robert H. Sanders

Traduction de Benoît Clenet

La matière noire permet de trouver une explication à une multitude d'observations astronomiques. Comment et pourquoi cette forme mystérieuse de matière dans l'Univers s'est-elle imposée jusqu'à devenir le paradigme majeur de l'astrophysique ?

Edition 2012 | 22,50 € | 230 p.

